



Sebastião Alvarez Martins dos Santos Silva

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Sistematização de Metodologias de
Projeto e Fabrico de Moldes de Injeção
de Peças para a Indústria Aeronáutica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Jorge Joaquim Pamies Teixeira, Professor
Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Idálio Silva, UEpro - Engenharia de Moldes

Júri:

Presidente: Professora Doutora Rosa Maria
Mendes Miranda

Arguentes: Professor Doutor António Gabriel
Marques Duarte dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2015

[Sistematização de Metodologias de Projeto e Fabrico de Moldes de Injeção de Peças para a Indústria Aeronáutica]

Copyright © Sebastião Alvarez Martins dos Santos Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Professor Jorge Joaquim Pamies Teixeira, pelo apoio demonstrado e pela partilha de conhecimento na realização deste trabalho.

De seguida, o meu agradecimento dirige-se ao meu co-orientador, Eng^o Idálio Silva, gerente da UEpro, pela supervisão de todo o trabalho desenvolvido e da escrita da presente dissertação.

Um agradecimento especial aos colaboradores da empresa UEpro – Engenharia de Moldes, pelo bom ambiente proporcionado e pela disponibilidade, nomeadamente à Ilda Pereira, Daniel Alves e Mário Leal por todo o apoio técnico no projeto e discussão de resultados obtidos.

Agradeço à Eng^a Teresa Neves e ao Eng^o Edson Nascimento, da empresa Simulflow, pela disponibilização do software Moldex3D para este trabalho e por todo o seu contributo no que respeita à utilização do programa e interpretação de resultados obtidos.

Agradeço ao Eng^o João Alexandre por toda a disponibilidade demonstrada durante o projeto e fabrico do molde. Agradeço também ao projetista Rafael Silva pela experiência e conhecimento transmitidos durante o projeto e modelação do molde. Ambos da empresa RGE – Engenharia de Moldes.

Aos amigos e colegas, da geração 2010, pelo companheirismo, esforço e apoio nestes 5 anos, pois sem eles teria sido mais difícil ultrapassar os obstáculos que se atravessaram neste caminho.

Por fim, endereço o meu maior agradecimento aos meus pais. Pelas palavras de força e motivação que tornam mais claro tudo aquilo por vezes possa parecer mais sombrio. Por todo o apoio com o qual sempre pude contar ao longo deste percurso, tanto nos bons como nos maus momentos.

Resumo

A indústria aeronáutica é extremamente exigente, na qual existe sempre uma constante necessidade de aperfeiçoamento de forma a que tudo seja o melhor possível, otimizando os processos e a fiabilidade, reduzindo ainda os custos. Da junção desta com a indústria dos moldes de injeção, que prima pelo rigor, precisão, prazos de fabrico e garantia de construção, resulta numa necessidade de compromisso entre ambas, com a finalidade de obter peças de elevada qualidade e precisão, moldes de injeção capazes de cumprir a sua função pelo período de tempo estabelecido, tendo sempre em consideração a redução de custos e tempos de fabrico.

A presente dissertação tem por base o projeto de um molde de injeção de peças em PEEK ESD 101 que serão *brackets* estruturais das asas de aviões da Bombardier. Durante o projeto, utilizou-se o software de simulação Moldex3D que permitiu fazer uma comparação e otimização do mesmo, do início ao fim.

Foram testados diversos aspetos do projeto, podendo verificar a sua contribuição para o sucesso do projeto, levando à alteração de alguns desses aspetos a fim de reduzir o número de testes até à aprovação do molde, evitando assim correções feitas por intuição e/ou experiência. O aspeto de maior relevância neste estudo foi o contributo das fugas de gases, não só por ser o aspeto com mais falhas em projetos anteriores, como também por ser aquele em que durante o projeto do molde da dissertação, melhor se pode comparar a simulação com a realidade e mais evidentes foram os resultados obtidos e maior a contribuição do Moldex3D para a sua correção.

A utilização desta ferramenta contribuiu para a melhoria de todo o projeto, tendo sido obtidos resultados bastante satisfatórios, promissores de que a sua aplicação é uma mais valia para a otimização dos projetos de moldes de injeção, não só para a indústria aeronáutica, como também num contexto geral.

Palavras chave:

Molde de injeção

PEEK

Simulação

Fugas de Gases

Abstract

The aeronautics industry is extremely demanding, which is in a constant need of improvement in order to make everything as better as it could be, optimizing its processes and reliability, still reducing costs. From the joint of this with the injection moulding industry, recognised by its standards of rigour, precision, deadlines and construction warranty, results in a need of compromise between both. With the final goal to obtain parts of high quality and precision, injection moulds able to accomplish their targeted function by the established period of time, always having in consideration the costs and manufacturing times associated.

The present master's thesis regards an injection mould to produce parts in PEEK ESD 101 that will be structural brackets for the Bombardier aircrafts' wings. During the project has been used the simulation software Moldex3D that allowed to make a comparison and optimization of it, from top to bottom.

Several aspects of the project have been tested to check their contribution to the project success, leading to the change of some of them in order to reduce the number of trials until the mould approval, avoiding corrections made by intuition and/or experience. The most relevant aspect was the location of air vents. Not only because it is the one with more failures in previous projects, but also the one that could better be compared between the simulation and the reality during the mould project used in this thesis. Its results were much more accurate and bigger was the contribution from Moldex3D to their improvement.

The introduction of this tool contributed successfully to the improvement of the injection mould project, which obtained satisfactory results, promising that its application can be an asset to the optimization of the injection mould project, not only for the aeronautics industry, as well to the general context of injection moulding.

Key Words

Injection Mould

PEEK

Simulation

Air Vents

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Motivações	1
1.3 Estrutura	1
2 Estado da Arte	3
2.1 Contexto Industrial dos Moldes de Injeção	3
2.2 O Molde de Injeção	3
2.2.1 Funcionamento.....	4
2.2.2 Método de Criação de um Molde	7
2.3 Máquina de Injeção	8
2.3.1 Unidade de Potência	10
2.3.2 Unidade de injeção.....	11
2.3.3 Unidade de fecho	11
2.3.4 Unidade de comando	12
2.3.5 Injeção multi-componente	12
2.4 Aspectos a ter em conta no Projeto	13
2.4.1 Mecanismo para a moldação do artigo final.....	13
2.4.2 Força de Fecho	13
2.4.3 Ângulos de Saída	15
2.4.4 Padrão de Enchimento	15
2.4.5 Linhas de Soldadura.....	16
2.4.6 Sistema de Alimentação.....	17
2.4.7 Sistema de Fugas de Gases	27
2.4.8 Sistema de Arrefecimento	30

2.4.9	Sistema de Extração	32
2.4.10	Contração e empeno da Peça.....	42
2.5	Parâmetros do processo	45
2.5.1	Refrigeração (Regulação do Caudal).....	45
2.5.2	Temperatura do molde	46
2.5.3	Velocidade de injeção	47
2.5.4	Pressão de injeção	48
2.5.5	Pressão de manutenção.....	49
2.5.6	Tempo de Arrefecimento	49
2.6	Simulação da Injeção – Métodos Numéricos.....	50
2.6.1	Branching Flow	50
2.6.2	Simulação 2.5D	51
2.6.3	Simulação <i>Dual-Domain</i>	52
2.6.4	Simulação 3D	52
2.7	Engenharia Simultânea	53
2.8	PEEK	54
3	Proposta de Resolução de Problema.....	57
3.1	Aeronáutica	58
4	Metodologias	59
4.1	Análise de moldes anteriores ao estudo	59
4.2	Peça para o estudo	60
4.3	Especificações do molde.....	62
4.4	Projeto do Molde	63
4.4.1	Mecânica do molde	66
4.4.2	Injeção da peça	67
4.4.3	Sistema de Extração	68
4.4.4	Sistema de Refrigeração	69
4.4.5	Fugas de Gases	71
4.4.6	Placas isolantes.....	72
4.5	Simulação Moldex3D.....	73
4.5.1	Moldex3D Designer	73

4.5.2	Moldex3D	76
4.6	Fabrico do molde.....	77
4.7	Teste 1 do molde.....	77
4.8	Correções ao teste 1 do molde	83
4.9	Teste 2 do molde.....	85
5	Resultados.....	89
5.1	Resumo do Cálculo	89
5.2	Enchimento.....	90
5.2.1	Padrão de Enchimento	90
5.2.2	Linhas de Soldadura.....	94
5.2.3	Fugas de Gases	95
5.2.4	Rechupes	97
5.2.5	Força de Fecho	98
5.2.6	Massa da moldação	99
5.3	Arrefecimento	99
5.4	Empeno	103
5.5	Sumário dos Resultados	106
6	Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro.....	107
7	Bibliografia	109
8	Anexos.....	111

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Constituição elementar de um molde de injeção [3].	4
Figura 2.2 – Ciclo de injeção [1].	7
Figura 2.3 – Constituição de uma máquina de injeção [5].	10
Figura 2.4 – Unidades que compõem uma máquina de injeção [1].	10
Figura 2.5 – Fuso de uma máquina de injeção [1].	11
Figura 2.6 – Ilustração representativa de um tipo de máquina multi-componente [6].	12
Figura 2.7 – Exemplo de uma peça composta por dois materiais injetados, no mesmo molde, através de uma máquina de injeção bi-componente.	12
Figura 2.8 – Esquema simplificado de um elemento móvel num molde [7].	13
Figura 2.9 – Área projetada por uma peça, sobre a bucha do molde [1].	14
Figura 2.10 – Exemplos de aspetos a evitar relativamente a ângulos de saída, e possíveis soluções [10].	15
Figura 2.11 – União de duas frentes de fundido [9].	16
Figura 2.12 – Localização de linhas de soldadura consoante a localização da injeção [9].	16
Figura 2.13 – Zonas em que uma linha de soldadura pode ser crítica [9].	17
Figura 2.14 – Alterações das linhas de soldadura [8].	17
Figura 2.15 – Configuração de um sistema de alimentação (frio) [1].	18
Figura 2.16 – Aspecto de um injetor [1].	18
Figura 2.17 - Puxadores de jito [1].	19
Figura 2.18 – Geometrias utilizadas nos canais de injeção [1].	19
Figura 2.19 – Frente de fundido num canal de alimentação [1].	20
Figura 2.20 – Ajuste de canais de alimentação [1].	20
Figura 2.21 – Equilíbrio dos canais de alimentação [1].	21
Figura 2.22 – Vantagens e desvantagens dos tipos de disposição dos canais de alimentação. [1]	21
Figura 2.23 – Ilustração de poços frios [1].	22
Figura 2.24 – Ataque de jito direto [1].	23
Figura 2.25 – Ataque à junta [1].	23
Figura 2.26 – Ataque em lâmina e enchimento uniforme da peça [1].	24
Figura 2.27 – Ataque em leque [1].	24
Figura 2.28 – Ataque em diafragma [1].	25
Figura 2.29 – Ataque em anel [1].	25
Figura 2.30 – Injeção submarina [1].	26
Figura 2.31 – Injeção submarina curva [1].	26
Figura 2.32 – Injeção num extrator [1].	26
Figura 2.33 – Rasgos maquinados para fugas de gases [1].	27
Figura 2.34 – Rasgo de fugas de gases em torno de toda a peça [1].	28
Figura 2.35 – Exemplo de pontos em que não é possível criar fugas de gases [1].	28

Figura 2.36 – Extratores a funcionar como fugas de gases [1].	29
Figura 2.37 – Postiços para fugas de gases [1].	29
Figura 2.38 – Aço poroso para fugas de gases [1].	29
Figura 2.39 – Exemplo de um sistema de arrefecimento simples [1].	31
Figura 2.40 – Componentes de um sistema de extração comum [1].	33
Figura 2.41 – Extrator cilíndrico [1].	35
Figura 2.42 – Vista em corte de um molde com extratores cilíndricos [1].	36
Figura 2.43 – Marcas causadas nas peças pela utilização de extratores circulares [1].	36
Figura 2.44 – Extrator rebaixado [1].	37
Figura 2.45 – Peça com nervuras, na qual é recomendada a utilização de extratores de lâmina [1].	37
Figura 2.46 – Extrator de lâmina [1].	38
Figura 2.47 – Extrator tubular [1].	38
Figura 2.48 – Vista em corte de um molde com extrator tubular [1].	39
Figura 2.49 – Vantagem da utilização de extratores tubulares, comparativamente a extratores cilíndricos [1].	39
Figura 2.50 – Extrator tipo válvula [1].	40
Figura 2.51 – Extração com placa extratora [1].	40
Figura 2.52 – Extração com aro extrator [1].	41
Figura 2.53 – Extração com barra extratora [1].	42
Figura 2.54 – Sugestões para boas práticas de posicionamento de extratores [1].	42
Figura 2.55 – Casca solidificada numa peça moldada [1].	44
Figura 2.56 – Espessuras uniformes [1].	45
Figura 2.57 – Transição suave de espessuras [1].	45
Figura 2.58 – Evolução da pressão em função da velocidade de injeção [1].	47
Figura 2.59 – Escalonamento da velocidade de deslocação do fuso [1].	48
Figura 2.60 – Pressão hidráulica e pressão do fundido [1].	48
Figura 2.61 – Variação da pressão [1].	49
Figura 2.62 – Cálculo do comprimento de fluxo [1].	51
Figura 2.63 – Superfície média 2.5D [1].	51
Figura 2.64 – Malha superficial triangular “Dual-Domain” [1].	52
Figura 2.65 – Malha sólida 3D [1].	53
Figura 2.66 – Comparação dos fluxogramas do processo de atividades sequencial e Engenharia Simultânea [1].	54
Figura 2.67 – Pirâmide para escolha de materiais a utilizar em função das necessidades [1].	55
Figura 4.1 – Quadro utilizado para a avaliação de um molde.	59
Figura 4.2 – Peça utilizada para o estudo do molde (THP Brackets G02810036-001).	61
Figura 4.3 – Peça simétrica à utilizada no estudo, injetada também no mesmo molde (THP Brackets G02810036-002).	61
Figura 4.4 – Especificações para a máquina de injeção prevista.	62

Figura 4.5 – Modelação 3D do molde M1724.	66
Figura 4.6 – Ilustração representativa dos furos e pormenores de encaixe que originam a necessidade da utilização de elementos móveis.	67
Figura 4.7 – Elementos móveis.	67
Figura 4.8 – Canal de injeção e ataque à peça, em leque.	68
Figura 4.9 – Pormenor da abertura do ataque em leque.	68
Figura 4.10 – Localização dos extratores.	69
Figura 4.11 – Extrator posicionado (à esquerda) e extrator cilíndrico normal (à direita).	69
Figura 4.12 – Circuito de refrigeração da cavidade.	70
Figura 4.13 – Circuito de refrigeração da bucha.	70
Figura 4.14 - Circuito de refrigeração do elemento móvel.	71
Figura 4.15 – Disposição das resistências do molde	71
Figura 4.16 – Canais de fugas de gases do lado da cavidade.	72
Figura 4.17 – Canais de fugas de gases do lado da bucha e dos elementos móveis.	72
Figura 4.18 – Ilustração das placas isolantes no molde.	73
Figura 4.19 – Peça e ataque em malha (Moldex3D Designer).	74
Figura 4.20 – Canais de refrigeração com entradas e saídas indicadas (Moldex3D Designer).	75
Figura 4.21 – Especificação do pormenor do circuito com palheta na refrigeração do elemento móvel.	75
Figura 4.22 – Conjunto criado para a simulação. (Moldex3D Designer).	75
Figura 4.23 – Máquina de injeção utilizada no teste do molde M1724, Sandretto serienove 125.	77
Figura 4.24 – Molde M1724 na máquina de injeção, a aquecer para se iniciar o 1º teste.	78
Figura 4.25 – Controlador de temperatura com valor estabelecido de 220°C.	78
Figura 4.26 – Sequência do enchimento da peça.	79
Figura 4.27 – Ilustração dos comentários feitos ao teste 1.	81
Figura 4.28 – Marcas de queimados pela falta de eficiência de fugas de gases.	81
Figura 4.29 – Polimento deficiente na superfície da peça moldada pelo elemento móvel.	82
Figura 4.30 – Rebarbas à junta entre o elemento móvel e a cavidade.	82
Figura 4.31 – Rasgos para fugas no elemento móvel, após o primeiro teste.	83
Figura 4.32 – Rasgos para fugas na cavidade, após o primeiro teste.	84
Figura 4.33 – Rasgos para fugas no elemento móvel, após as correções.	85
Figura 4.34 – Ausência de fugas na primeira região queimada no teste 1.	86
Figura 4.35 - Ausência de fugas na segunda região queimada no teste 1.	87
Figura 4.36 – Melhoria do polimento observado.	87
Figura 4.37 – Produto final obtido no fim do 2º teste do molde M1724 (THP Brackets G02810036-001).	88
Figura 5.1 – Resumo do enchimento, duração das etapas da simulação.	90
Figura 5.2 – Comparação da amostra 1 com o estágio equivalente da simulação da injeção.	91
Figura 5.3 – Comparação da amostra 5 com o estágio equivalente da simulação da injeção.	91

Figura 5.4 – Comparação da amostra 6 com o estágio equivalente da simulação da injeção. .	91
Figura 5.5 – Comparação da amostra 7 com o estágio equivalente da simulação da injeção. .	92
Figura 5.6 – Comparação da amostra 8 com o estágio equivalente da simulação da injeção. .	92
Figura 5.7 – Comparação da amostra 9 com o estágio equivalente da simulação da injeção. .	92
Figura 5.8 – Detalhe do enchimento da amostra “9” numa zona crítica do enchimento.	93
Figura 5.9 – Comparação da amostra 10 com o estágio equivalente da simulação da injeção.	93
Figura 5.10 – Comparação da amostra 11 com o estágio equivalente da simulação da injeção.	93
Figura 5.11 – Linhas de soldadura junto dos furos dos elementos móveis	94
Figura 5.12 – Linhas de soldadura junto dos furos criados pela bucha.....	94
Figura 5.13 – Localização de zonas de prisão de ar na peça, vista de frente.....	95
Figura 5.14 – Localização de zonas de prisão de ar na peça, vista de lateral.	96
Figura 5.15 – Pormenor de fuga localizada, semelhante à observada no teste 1.....	96
Figura 5.16 – Distribuição e profundidade dos rechupes observados (vista frontal).....	97
Figura 5.17 – Distribuição e profundidade dos rechupes observados (vista posterior).....	98
Figura 5.18 – Evolução da força de fecho, em toneladas, necessária para manter o molde fechado, durante o enchimento e a compactação, ao longo do tempo.	98
Figura 5.19 – Evolução da massa da moldação, durante o enchimento e compactação, ao longo do tempo.....	99
Figura 5.20 – Temperatura ao longo da superfície da peça, no final do tempo de arrefecimento (vista frontal).....	100
Figura 5.21 – Temperatura ao longo da superfície da peça, no final do tempo de arrefecimento (vista inferior).....	100
Figura 5.22 – Temperatura ao longo espessura da peça, no final do tempo de arrefecimento (vista em corte).	101
Figura 5.23 – Temperatura máxima verificada na espessura da peça, após o arrefecimento.	101
Figura 5.24 – Tempo de arrefecimento necessário para a extração, ao longo da peça (vista de corte em Y).....	102
Figura 5.25 – Tempo de arrefecimento necessário para a extração, ao longo da peça (vista de corte em X).....	102
Figura 5.26 – Empeno em X.	104
Figura 5.27 – Empeno em Y.	104
Figura 5.28 – Empeno em Z.....	105
Figura 5.29 – Empeno na superfície de base, junto ao jito, em Z.	105
Figura 5.30 – Fluxograma ilustrativo da aplicabilidade do Moldex3D na indústria dos moldes de injeção.	106

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Ângulo de saída recomendado para diversos materiais. [1].....	15
Tabela 2.2 – Profundidades típicas de rasgos para fugas de gases para alguns plásticos mais comuns. [1].....	28
Tabela 2.3 – Valores de contração para alguns termoplásticos [1].	43
Tabela 2.4 – Dispositivos e meio arrefecedor para determinadas gamas de temperaturas [1].	46
Tabela 2.5 – Propriedades do PEEK [12]	55
Tabela 2.6 – Características do PEEK para moldação. [12]	56
Tabela 2.7 – Parâmetros adaptados pela UEpro	56
Tabela 4.1 – Resumo da análise feita, apresentando valores totais.	60
Tabela 4.2 – Aço a utilizar nos componentes do molde e respetivos tratamentos térmicos.	63
Tabela 4.3 – Prazos para as etapas principais do molde.	63
Tabela 4.4 – Propriedades das placas isolantes VOLTIS HP 2061.	73
Tabela 4.5 – Parâmetros introduzidos na simulação do Moldex3D.....	76
Tabela 4.6 – Propriedades do óleo 5-32 utilizado.....	79
Tabela 4.7 – Condições finais do 1º teste do M1724.....	80
Tabela 4.8 – Condições finais do 2º teste do M1724.....	86

1 Introdução

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste na análise dos moldes de injeção de componentes em PEEK até então produzidos pela empresa, com o intuito de determinar os aspetos em que ocorrem mais falhas, e assim desenvolver metodologias e soluções a fim de os evitar, melhorando a conceção do molde, reduzindo também o seu tempo de produção e minimizando essencialmente o número de testes necessários até à aprovação do mesmo.

1.2 Motivações

Dadas as pressões sentidas na indústria aeronáutica relativamente à diminuição de emissões por parte das aeronaves e ao aumento da eficiência de consumo de combustível de modo a preservar as reservas de combustíveis fósseis, há a necessidade por parte das construtoras de desenvolver os seus projetos neste sentido. Uma medida a tomar, relacionada com o contexto desta dissertação, passa pela redução de peso nas aeronaves.

Assim sendo, é um desafio poder contribuir para o seu desenvolvimento através do projeto de moldes de injeção de peças plásticas para substituição de componentes metálicos atualmente presentes nas aeronaves, contribuindo também para a indústria dos moldes de injeção no contexto geral. Neste caso especificamente, trata-se da produção de componentes estruturais das asas dos aviões, em PEEK ESD101, que é um compósito polimérico muito específico para a indústria aeronáutica.

1.3 Estrutura

Para a elaboração da presente Dissertação contou-se com a colaboração da empresa UEpro – Engenharia de Moldes, situada na Marinha Grande (um dos principais centros de produção de moldes em Portugal). É uma empresa fornecedora de moldes de injeção (plástico, alumínio e zamac), compressão e sopro.

Numa indústria de custos elevados como é a dos moldes de injeção, não é possível, para estudos académicos, projetar e fazer um molde para realizar estudos experimentais que demonstrem a veracidade dos resultados obtidos. No entanto, esta dissertação consiste no acompanhamento

de um molde encomendado por um cliente, que permitirá fazer alguns estudos durante o seu projeto, construção e testes, até ao momento em que será exportado. Ainda contará com o *software* de simulação de injeção Moldex3D, que permite uma boa aproximação do contexto real em que se insere a injeção de moldes para a obtenção de peças plásticas.

Inicia-se a dissertação com o capítulo 1 que apresenta os objetivos da mesma, motivações que levaram à escolha do tema e a estrutura da dissertação. O capítulo 2 apresenta o Estado da Arte que ilustra o contexto em que a dissertação se insere, nomeadamente no projeto e funcionamento de um molde, referindo os aspetos que se devem considerar no projeto e os tipos de soluções existentes, assim como alguns parâmetros importantes na injeção. Segue-se o capítulo 3 no qual é apresentada a Proposta de Resolução de problema que tem por base o número elevado de testes considerando o custo elevado do material, para o qual devem ser criadas metodologias e soluções a fim de reduzir o nº de testes e obter a aprovação do molde. No capítulo 4 inicia-se a componente prática em que se aborda o que se elaborou e como se elaborou de modo a atingir os objetivos previstos, desde o projeto do molde, passando pela criação da simulação, até aos testes e aprovação do molde. O capítulo 5 ilustra os resultados obtidos através da simulação utilizando o Moldex3D, tratando o modo como estes podem influenciar o projeto. O último capítulo apresenta as conclusões finais atingidas através da dissertação e algumas propostas de trabalho futuro relacionadas com este tema.

2 Estado da Arte

2.1 Contexto Industrial dos Moldes de Injeção

Nas décadas de 40/50 a fabricação de moldes para injeção de plástico teve início em Portugal, nomeadamente na zona da Marinha Grande. Esta cidade industrial acolheu este tipo de indústria, pois era já conhecida como a capital do vidro em Portugal e possuía já a tecnologia da produção de moldes para vidro. Vários fabricantes especializaram-se em moldes de injeção de plástico, tornando a cidade num cluster da indústria de moldes de injeção de plástico, possuindo cerca de 70% desta indústria a nível nacional, estando 25% na zona de Oliveira de Azeméis e os restantes 5% distribuídos pelo resto do país.

O facto de na Marinha Grande se encontrar todo o tipo de empresas relacionadas com a indústria de moldes, tais como empresas fornecedoras de acessórios, aços, tratamentos térmicos, sistemas de injeção, testes de moldes, tornam a zona num polo com todos os intervenientes a poucos minutos de distância. Esta particularidade faz da Marinha Grande uma zona apetecível a clientes que podem encontrar todas as soluções que necessitam, obtendo assim, melhores prazos de fabrico. Dada a forte concorrência local, a qualidade é um objetivo das empresas na tentativa de se destacarem dos concorrentes.

2.2 O Molde de Injeção

Os moldes de injeção são hoje os mais largamente divulgados no processamento de polímeros. Os primeiros moldes foram concebidos, ainda no séc. XIX, quando os irmãos Hyatt, nos Estados Unidos patentearam a primeira máquina de injeção para um material celulósico [1]. No capítulo “Máquina de Injeção” dá-se um pouco de mais profundidade a este desenvolvimento.

Um molde em aço para injeção de plástico é uma ferramenta complexa e de alta precisão. Este é uma ferramenta de transformação utilizada para conformar uma matéria viscosa, introduzida sob pressão e a temperaturas elevadas no seu interior através de máquinas especiais (máquinas de injeção), promovendo o arrefecimento e solidificação da matéria até que seja possível proceder à extração da peça final. É utilizado essencialmente para produção em grandes quantidades.

Um molde de injeção consiste basicamente em duas metades, que estão diretamente montadas nos pratos de uma máquina de injeção. Estes dois elementos básicos, a metade estacionária, onde se faz a injeção e a metade móvel da ejeção, podem ser encontrados em todos os moldes,

independentemente do seu design. Podem também ser chamados de Cavidade e Bucha, designação dada pelos industriais do setor (serão chamados por estes nomes ao longo da dissertação). A Cavidade corresponde à metade estacionária, através da qual o material é injetado para a zona moldante. Por sua vez, a Bucha corresponde à metade móvel, na qual se encontra o sistema de ejeção (extração) da peça moldada. [2]

A Figura 2.1 representa a configuração típica de um molde de injeção.

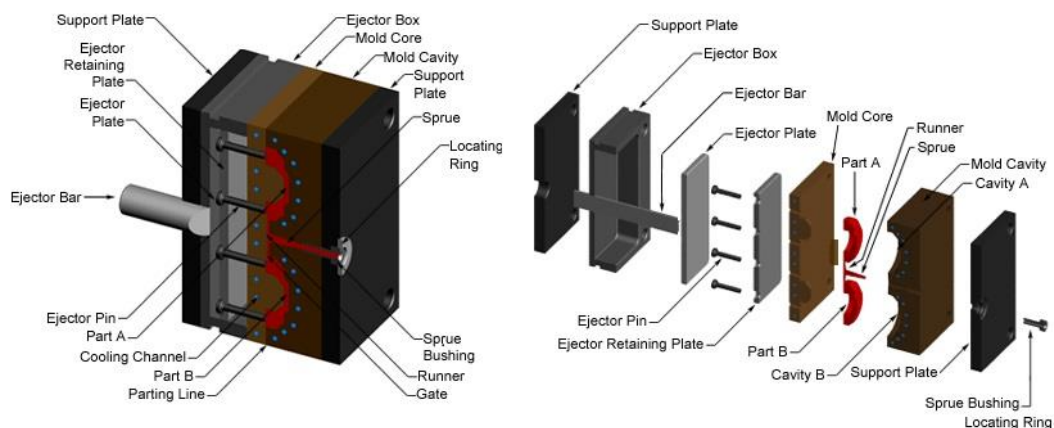


Figura 2.1 – Constituição elementar de um molde de injeção [3].

2.2.1 Funcionamento

O funcionamento de um molde de injeção é cíclico. Esse ciclo é chamado de ciclo de injeção (Figura 2.2). A otimização deste ciclo é fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, dado o elevado investimento em capital, requerido para a instalação deste tipo de equipamento.

Na atividade industrial o objetivo é produzir peças, conforme as respetivas especificações, no mais curto intervalo de tempo possível. Para o efeito, condições de processamento tais como a pressão de injeção, temperatura do fundido e do molde, velocidade de injeção e contra-pressão, necessitam de ser ajustadas tendo em conta as propriedades do material, a geometria da moldação e as especificações do produto final. As fases do ciclo de moldação são praticamente independentes do tipo de máquina. Contudo, a sua duração pode ser muito diversa, variando de tempos inferiores a 1 segundo para peças muito finas, a várias dezenas de minutos para moldações muito espessas.

O ciclo de injeção pode ser caracterizado como uma sequência de 6 fases:

2.2.1.1 Fase 1 - Fecho e trancamento

Esta operação corresponde ao início do ciclo (quer o funcionamento seja em regime automático ou semi-automático) e deve ser tão rápida quanto possível. No entanto, existem limitações às velocidades a utilizar para o fecho do molde:

- A inércia das grandes massas metálicas dos conjuntos molde/ pratos da máquina;
- A necessidade de o encosto das duas partes do molde ser suave para evitar a danificação das superfícies de ajustamento;
- Eventuais movimentos internos no molde, que se desenvolvam simultaneamente com o avanço do molde.

De facto, o tempo para esta operação depende das performances da máquina, das características do molde e da distância a percorrer (curso de fecho). A sua otimização implica a minimização do intervalo de abertura entre as metades dos moldes (ajustado ao valor mínimo necessário para possibilitar a ejeção das peças) e o ajuste criterioso das velocidades de fecho utilizadas.

2.2.1.2 Fase 2 – Injeção

A fase da injeção é garantida pelo avanço linear do fuso que, funcionando como um êmbolo, força o material fundido (previamente depositado à sua frente) a entrar no molde e a fluir no interior da cavidade. Devido à diferença de temperatura entre a unidade de injeção e o molde, o percurso entre os mesmos deve ser o mínimo possível, de modo a que o fundido tenha a capacidade de fluir dentro do molde apesar da queda de temperatura [2]. A injeção inicia-se após o cilindro ter encostado o bico ao molde e deverá terminar quando a cavidade está preenchida a 95% do respetivo volume.

A velocidade de injeção selecionada (ou idealmente o escalonamento de velocidades) deve corresponder a um compromisso entre rapidez (para assegurar o enchimento global da impressão) e a qualidade do produto final (velocidades muito elevadas podem gerar marcas na superfície, efeitos de jato ou sobreaquecimentos da matéria-prima). De facto, para cada moldação existirá um ajuste de velocidade ótimo, correspondendo à situação em que as especificações do produto final são garantidas com um nível mínimo da pressão de injeção, sendo os caudais de injeção de 100 a 500 cm^3/s são prática comum. [1]

2.2.1.3 Fase 3 – Compactação

A seguir ao enchimento do molde, é necessário continuar a pressurizar a cavidade, a fim de reduzir o efeito de contração por arrefecimento e evitar o refluxo do fundido. No entanto, a

compactação não deve ser excessiva pois pode originar danos à peça, tais como o desenvolvimento de tensões internas e dificultar a sua extração.

Esta fase termina logo que a entrada do material nas zonas moldantes (ataque), ou a própria peça, estejam suficientemente arrefecidos para inibir o fluxo de material.

O ajuste desta fase é crítico para a qualidade do processo. De facto, o seu início está associado a uma mudança de regime de funcionamento do equipamento, que passa de uma fase de controlo da velocidade de injeção, para uma fase de controlo da pressão.

Esta fase pode ser também designada por segunda pressão ou pós-pressão. [1]

2.2.1.4 Fase 4 – Arrefecimento

Logo que tenha ocorrido a consolidação do ataque, o fuso pode começar a rodar iniciando a plasticização do material para o ciclo seguinte. Durante este processo, o fuso é obrigado a recuar por efeito da pressão criada pelo material que se vai depositando na sua frente. A moldação continua a arrefecer no molde. Quando o volume pretendido estiver doseado, o fuso pára.

A fase de arrefecimento termina assim que a peça atinge uma temperatura que permita a desmoldação sem distorção. Esta parte do ciclo é uma operação de troca do calor transportado pelo material, dependendo sobretudo espessura da moldação e do projeto do molde (nomeadamente do seu sistema de arrefecimento). Aqui deve também haver um compromisso, uma vez que velocidades de arrefecimento baixas (garantidas por temperaturas de molde elevadas) permitem reduzir as tensões internas, mas correspondem a aumentos significativos do tempo de ciclo. [1]

2.2.1.5 Fase 5 – Abertura e extração

O tempo para esta operação é uma função da máquina utilizada (nomeadamente das características da sua unidade de fecho), do curso de abertura do molde e dos movimentos desta ferramenta necessários para garantir a extração da peça. É uma operação crítica do ponto de vista produtivo, pois em simultâneo, e mediante a utilização de mecanismos apropriados, pode ser efetuada a separação do jito dos canais de alimentação. É cada vez mais frequente a utilização de dispositivos auxiliares de manipulação para garantir um elevado grau de automatização do processo. [1]

2.2.1.6 Fase 6 – Tempo de pausa

É o período de tempo que decorre entre o fim da extração e o início do novo ciclo, sendo desejável que seja nulo, o que deverá acontecer em situações de funcionamento em regime

automático. No entanto, pode ser prolongado nos casos em que a remoção da peça seja manual ou que tenha que ser feita a colocação de insertos. Pela sua própria natureza, o tempo de pausa depende da aptidão do operador, do nível de automatização do molde e do tipo de afinação utilizada. [1]

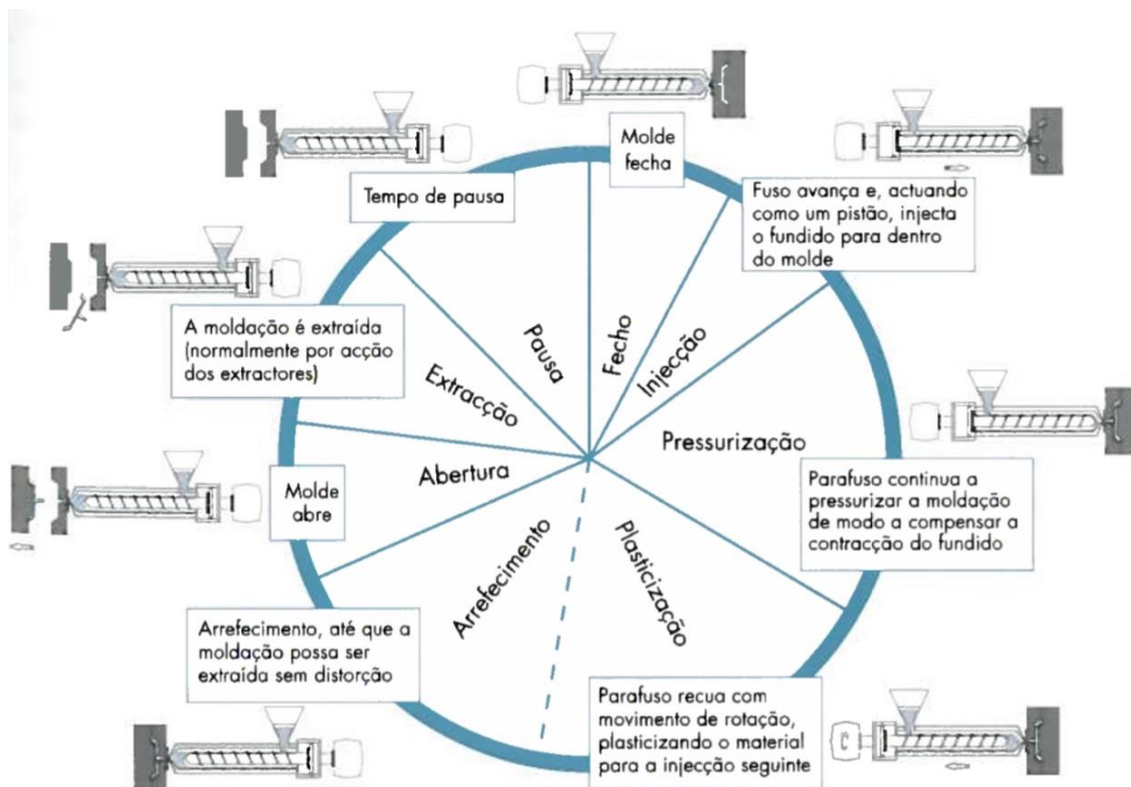


Figura 2.2 – Ciclo de injeção [1].

2.2.2 Método de Criação de um Molde

Para a realização de um molde, estão envolvidos trabalhadores especializados em diferentes áreas necessárias à sua concepção, fabricação e ensaios.

Com base num desenho da peça que se pretende obter por injeção, peça essa projetada por designers e engenheiros, começa-se por analisar se a peça pode ser moldada, avaliando as saídas de desmoldação, acabamentos de superfícies pretendidas e zonas negativas que requerem mecanismos especiais (elementos móveis, balancés, mecanismos de desenroscamento, pré-aberturas) de forma a que, se necessário, se adapte a peça às soluções possíveis.

Depois desta fase, elabora-se um projeto preliminar do molde, onde são definidas as dimensões, tipos de aço (em função do material plástico a injetar e da longevidade pretendida para o molde) e mecânica de funcionamento (extração, injeção, mecanismos especiais).

Após análise deste preliminar, onde poderão ser alteradas determinadas soluções, procede-se à encomenda de aços e inicia-se o desenho de projeto final, assim como se iniciam os programas de maquinaria para as operações iniciais, tais como desbastes e furações. Em paralelo, os desenhos avançam para a sua fase final e as maquinações de aço, elétrodos para electroerosão também iniciam a sua realização.

Um molde tem prazos de realização determinados no início do projeto que têm que ser forçosamente cumpridos de forma a que o cliente possa analisar, testar e até expor em feiras o seu próximo produto. Assim, é necessário elaborar um plano de fabricação que deve ser escrupulosamente cumprido.

Utilizando os mais diversos processos de maquinaria, desde a furação, fresagem, retificação e electroerosão por penetração ou por fio (processos mais utilizados), o processo termina com a montagem e ajustamento de todos os componentes do molde, feito por operários especializados nesta área.

Durante este processo, também se utilizam tratamentos térmicos, quer com o objetivo de redução de tensões adquiridas pelos processos de arranque de aços utilizados, quer pela necessidade de proceder a tratamentos de têmpera associadas a determinados tipos de aços escolhidos.

Segue-se o teste do molde, feito em máquinas de injeção idênticas às que o cliente irá utilizar na produção ao que se segue um processo de análise de peças, funcionamento do molde e correções necessárias à obtenção do produto de acordo com as especificações e desenho original (vulgarmente denominado desenho de artigo). Nesta fase, finaliza-se o acabamento de superfícies que normalmente é um acabamento obtido por aplicação de lixas, pastas de diamante ou textura química. Estas últimas operações são normalmente realizadas após aprovação da geometria, funcionalidade e dimensões das peças, assim como da mecânica do molde.

Tendo finalizado o processo de produção e aprovação do molde, este encontra-se em condições de iniciar a produção de peças plásticas, normalmente nas instalações do cliente.

2.3 Máquina de Injeção

A origem da máquina de injeção remonta ao ano de 1872 quando, nos EUA, J. W. Hyatt resolveu o problema da plastificação e moldação de uma mistura de nitrocelulose e cânfora com a sua “packing machine”. Esta máquina não era ainda chamada de máquina de injeção. A primeira máquina que pôde ser chamada de máquina de injeção foi construída por H. Buchholz em 1921. Era uma máquina tipo pistão semelhante ao fuso pressionado como é conhecido atualmente. Esta máquina era, obviamente, atuada manualmente. As primeiras máquinas de injeção produzidas em série foram feitas por Eckert e Ziegler GmbH em 1926. Apesar de o molde ainda

ser fechado à mão, a injeção já era feita pneumaticamente. A máquina era já construída para funcionar horizontalmente, princípio que é utilizado até à data.

O caminho da proeminência de máquinas de processamento de plástico começou em 1956 com a introdução do fuso como componente de plastificação e injeção sob pressão. Essa máquina já mostrava todos os aspectos de uma máquina de injeção como hoje é típico.

Uma máquina de injeção pode ser definida como uma máquina que produz objetos moldados de modo descontínuo primariamente por materiais macromoleculares. A moldação é uma moldação primária sob pressão. Parte do material plastificado na máquina é injetado através de um canal para o interior da cavidade do molde. Os componentes essenciais de uma máquina de injeção são a unidade de injeção, a unidade de fecho, e a unidade de controlo.

Atualmente, o potencial comprador de uma máquina de injeção pode escolher dentro de uma grande variedade de produtos, tamanhos e modelos. O processo de seleção começa a ser menos confuso à medida que o equipamento é totalmente examinado e os seus princípios de operação são compreendidos. As características que determinam a seleção de uma máquina são:

- Força de fecho (expressa em kN ou em toneladas);
- Distância entre colunas;
- Curso máximo de abertura;
- Espessura máxima e mínima dos moldes;
- Peso máximo do molde;
- Dimensões dos pratos;
- Curso de extração;
- Força de extração.

Se o operador estiver de frente para a máquina, então a unidade de injeção estará do seu lado direito do suporte e a unidade de fecho do lado esquerdo. Apesar de a maioria das máquinas ser horizontal, é também utilizado equipamento com unidades de fecho e injeção verticais. Também algumas máquinas possuem a possibilidade de comutar entre as duas posições. [4]

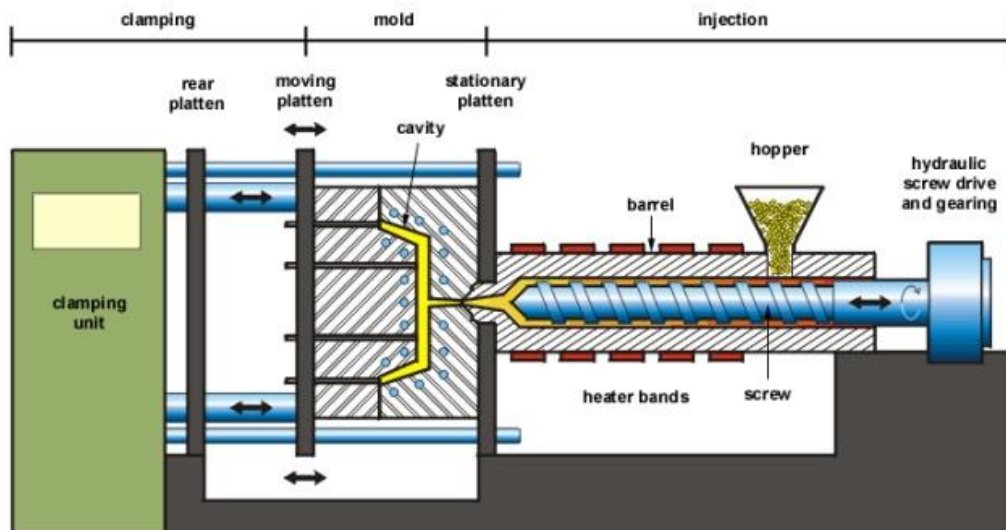


Figura 2.3 – Constituição de uma máquina de injeção [5].

A constituição típica de uma máquina de injeção é baseada em quatro unidades (Figura 2.4):

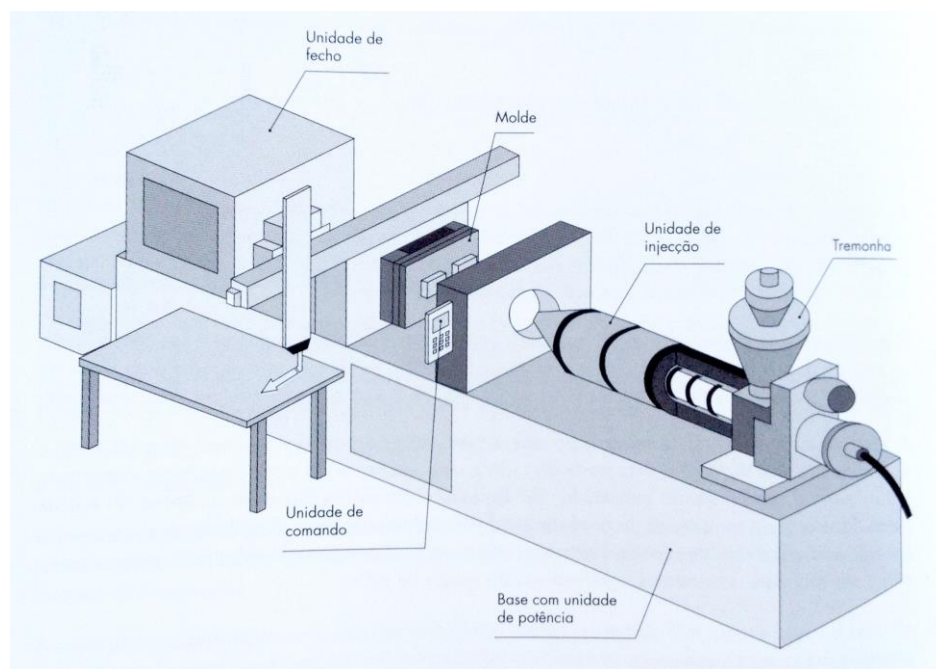


Figura 2.4 – Unidades que compõem uma máquina de injeção [1].

2.3.1 Unidade de Potência

Fornece a energia adequada aos diversos atuadores da máquina. Está baseada num sistema de pressão hidráulico, cuja bomba é acionada por um motor elétrico.

Designam-se por atuadores os cilindros hidráulicos (que garantem movimentos lineares) e os motores hidráulicos (que desenvolvem movimentos rotativos).

O conceito de unidade de potência é característico das máquinas de injeção baseadas em tecnologia óleo-hidráulica. De facto, esta é a solução tecnológica utilizada e praticamente única nos equipamentos de grandes dimensões. Contudo, as máquinas de injeção acionadas por motores elétricos têm vindo a ganhar grande importância. [1]

2.3.2 Unidade de injeção

Promove o transporte, aquecimento, plastificação e homogeneização do material (originalmente em grão ou pó), desde a base da tremonha até ao bico de injeção. Também garante a subsequente injeção e pressurização do fundido.

Na grande maioria dos casos está baseada num parafuso sem-fim (fuso) que garante os processos de plasticização e injeção. Os fusos das máquinas de injeção apresentam relações comprimento/diâmetro, L/D entre 18:1 e 22:1, sendo o valor típico 20:1. O seu curso máximo é 4D.

A Figura 2.5 apresenta a geometria típica de um fuso universal.

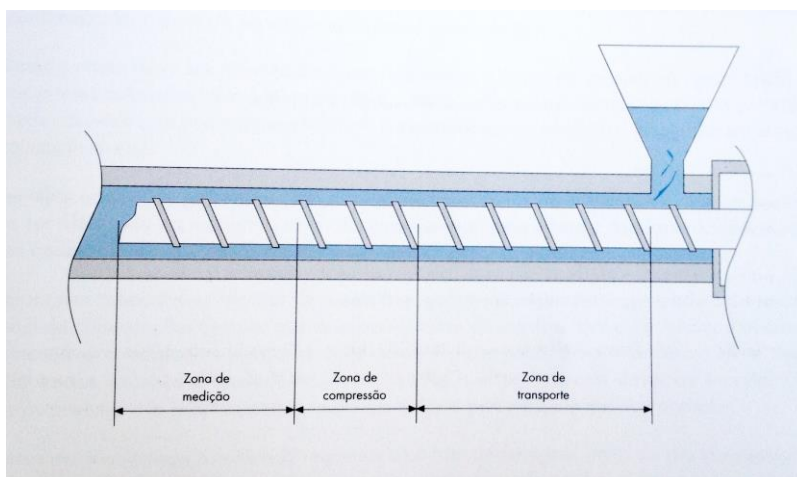


Figura 2.5 – Fuso de uma máquina de injeção [1].

A dimensão desta unidade quantifica-se pela capacidade de injeção (expressa em gramas). [1]

2.3.3 Unidade de fecho

Assegura a fixação e a movimentação do molde, devendo ser capaz de o manter fechado durante as fases de injeção e de pressurização. Integra também os dispositivos necessários à extração das peças moldadas.

Construtivamente, corresponde a uma prensa que terá de ser capaz de suportar a força resultante da injeção do plástico.

Quantifica-se pela força de fecho (normalmente expressa em kN ou toneladas). [1]

2.3.4 Unidade de comando

As operações e os dispositivos necessários para assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo estão centralizadas nesta unidade. Assegura, igualmente, a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão de informação. [1]

2.3.5 Injeção multi-componente

Com o desenvolvimento das máquinas de injeção, é também possível injetar peças compostas por materiais diferentes, dentro do mesmo molde, dentro da mesma máquina de injeção, no mesmo ciclo. É comum ver máquinas de bi-injeção e tri-injeção que injetam, respetivamente, dois e três materiais diferentes no mesmo molde (Figura 2.6).

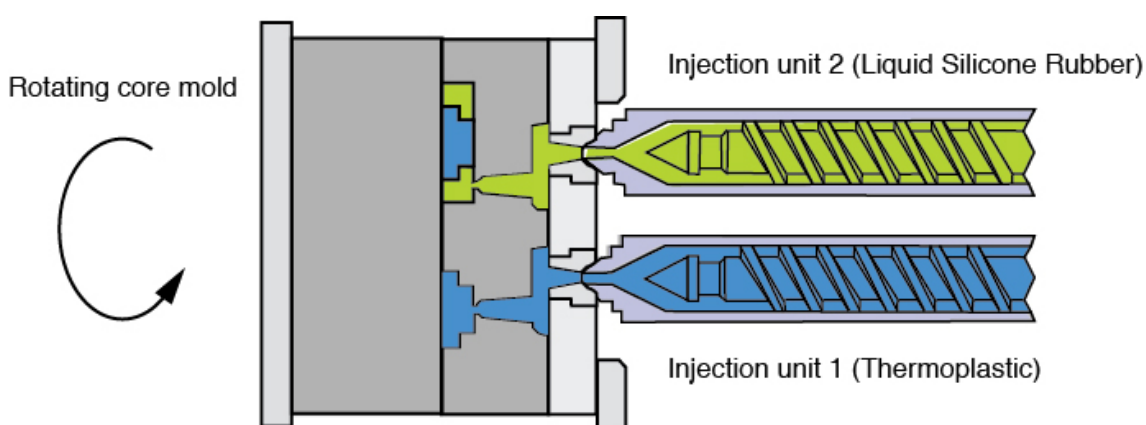


Figura 2.6 – Ilustração representativa de um tipo de máquina multi-componente [6].

A Figura 2.7 representa uma peça bi-componente, injetada no mesmo molde.



Figura 2.7 – Exemplo de uma peça composta por dois materiais injetados, no mesmo molde, através de uma máquina de injeção bi-componente.

2.4 Aspectos a ter em conta no Projeto

2.4.1 Mecanismo para a moldação do artigo final

Assim que se recebe o desenho ou modelação do artigo (denomina-se por artigo a peça final), é necessário verificar se a peça pode ser moldada. O objetivo é sempre tornar o molde o mais simples, fazendo alterações na peça (se possível). Quando se tem a modelação da peça com a sua forma final, sem poder simplificar mais, é necessário ver os negativos da mesma, e escolher a melhor posição para a posicionar no molde. É depois necessário ver que mecanismos além de abrir e fechar o molde são necessários para que os pinos extratores possam ejetar a peça. Estes mecanismos podem ser elementos móveis (Figura 2.8), balancés, desenroscamento de roscas, e muitos outros, consoante o tipo de peça. A necessidade de utilizar estes mecanismos influencia bastante o valor do molde.

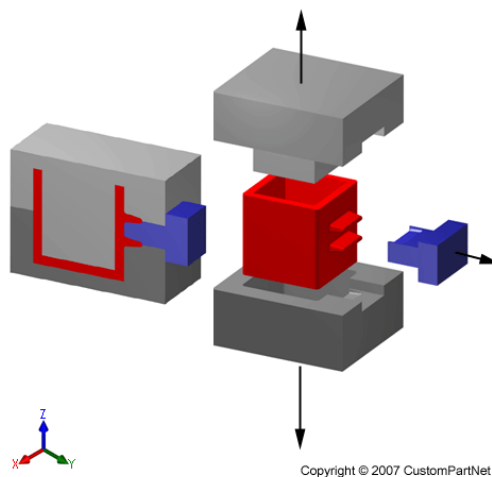


Figura 2.8 – Esquema simplificativo de um elemento móvel num molde [7].

2.4.2 Força de Fecho

Um requisito muito comum dos clientes é o limite da força de fecho, pois os moldes costumam destinar-se a máquinas específicas, desde o início do design da peça. Assim, é necessário ter-se em consideração este aspecto de modo a que o molde possa ser utilizado na máquina pretendida, cumprindo os requisitos máximos da força de fecho necessária. [8]

Designa-se por força de fecho o esforço desenvolvido pela unidade de fecho da máquina de injeção para manter o molde fechado, sendo expressa em kN ou toneladas. Esta força vai opor-se à resultante, sendo o eixo axial da máquina de injeção, da pressão exercida pelo polímero a

moldar sobre as paredes da zona moldante, sendo essa a área projetada da peça sobre a parede da bucha (Figura 2.9).

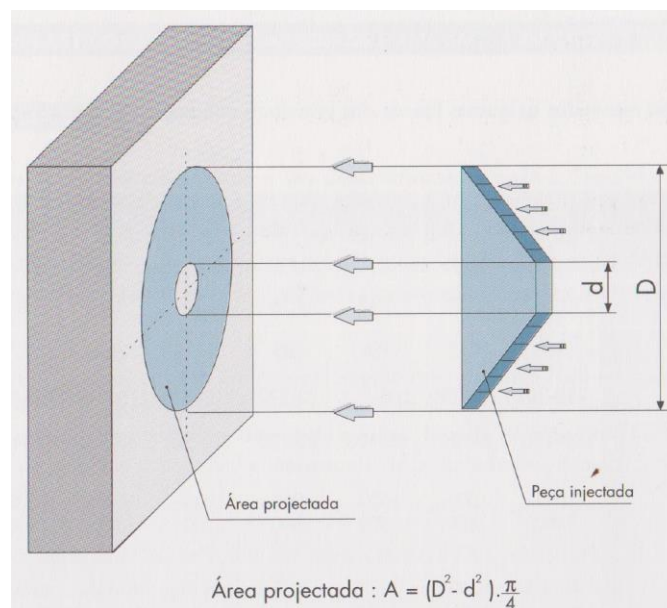


Figura 2.9 – Área projetada por uma peça, sobre a bucha do molde [1].

Se a capacidade de fecho da máquina for inferior à exercida pelo polímero, o molde abre e ocorre a formação de rebarba.

As máquinas devem ser ajustadas de modo a exercer uma força de fecho ligeiramente superior (cerca de 20%) à requerida para uma determinada moldação. De facto, a utilização de forças de fecho muito superiores ao necessário, além de desperdício energético, poderá provocar a danificação do molde. [1]

A estimativa rigorosa da força de fecho necessária para uma determinada moldação é complexa, pois requer o cálculo da distribuição de pressões na impressão. No entanto, poderão ser efetuadas previsões grosseiras com base na equação:

$$F_f = \frac{(A_p \times P_m)}{100}$$

Em que:

F_f - Força de Fecho (kN)

A_p - Área Projetada da moldação (cm^2)

P_m - Pressão média na impressão durante a fase de enchimento, cerca de 1/3 a 1/5 da pressão de injeção (bar).

2.4.3 Ângulos de Saída

Na altura da extração das peças moldadas, as mesmas tendem a ficar coladas as paredes, e se o ângulo for de 0 graus, vai haver arrastamento da peça ou pode mesmo não sair. [9]

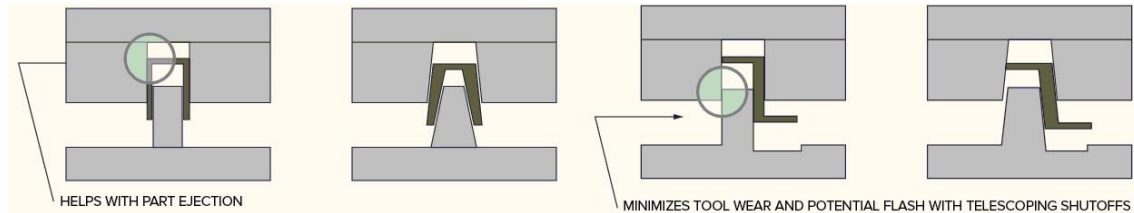


Figura 2.10 – Exemplos de aspetos a evitar relativamente a ângulos de saída, e possíveis soluções [10].

Assim, consoante o tipo de material e a geometria da peça, é necessário ter sempre ângulos de saída na ordem dos 0,5° a 3° para facilitar a extração das peças. Este valor pode aumentar significativamente, caso a superfície da peça seja texturada. Nestes casos, recomenda-se adicionar ao ângulo de saída 1° por casa 0,025mm de profundidade de textura.

A Tabela 2.1 apresenta o ângulo de saída para as peças sem textura, em função do tipo de material. Como se pode verificar, de um modo geral, peças produzidas com materiais mais rígidos e/ou que contraem mais, requerem ângulos de saída maiores. [1]

Tabela 2.1 – Ângulo de saída recomendado para diversos materiais. [1]

Material	ABS	PS	SAN	PP	HDPE	LDPE	PA	PC	PET	POM	PPO	PVC
Ângulo de saída recomendado	1-2°	1-1,5°	1,5-2°	0,5-1,5°	0,75-2°	0,75-2°	0,5-1,5°	0,5-1,5°	1-2°	0,5-1,25°	0,5-2°	0,5-1°

A utilização de ângulos de saída minimiza também o desgaste do molde. [9]

2.4.4 Padrão de Enchimento

O padrão de enchimento da cavidade de um molde é muito importante no momento em que se inicia o projeto de um molde. É definido pelo escoamento do fundido dentro da cavidade, durante a fase da injeção, em função do tempo. Este aspecto, influenciado diretamente pela geometria da peça e pela localização do ataque, permite prever e alterar possíveis problemas relacionados com as linhas de soldadura, o tipo de ataque/alimentação e a localização de eventuais fugas de gases, conforme pormenorizado nos subcapítulos seguintes.

2.4.5 Linhas de Soldadura

As linhas de união de material, comumente denominadas por linhas de soldadura, são formadas durante o enchimento da cavidade da peça quando a frente de material fundido se separa e se volta a unir mais tarde (Figura 2.11).

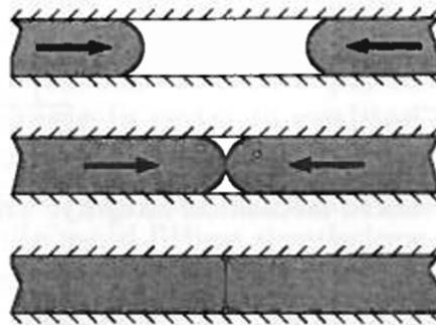


Figura 2.11 – União de duas frentes de fundido [9].

Esta separação da frente do material pode ser causada por furos, variações de espessura de parede, ou pela utilização de vários pontos de injeção (Figura 2.12).

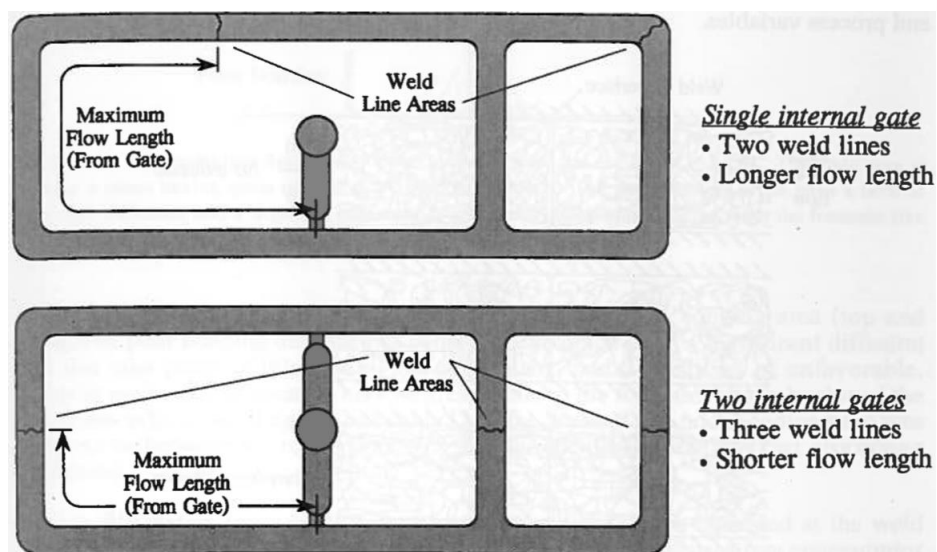


Figura 2.12 – Localização de linhas de soldadura consoante a localização da injeção [9].

As linhas de soldadura apresentam um aspecto de fissura na superfície da peça moldada. Estas linhas de soldadura são frequentemente visíveis a olho nu, e assim sendo são consideradas esteticamente inaceitáveis em diversas aplicações. Mais importante ainda, a resistência mecânica nas zonas de linhas de soldadura pode ser significativamente mais baixa que nas zonas mais afastadas. Esta é uma preocupação a ter em conta em casos de peças que serão sujeitas a cargas dinâmicas (Figura 2.13). [9]

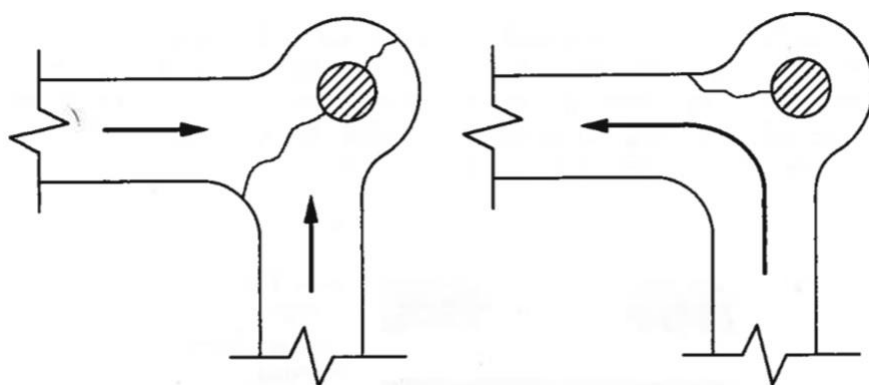


Figura 2.13 – Zonas em que uma linha de soldadura pode ser crítica [9].

No entanto, variando a localização do(s) ponto(s) de injeção, é possível modificar a localização destas linhas para zonas menos indesejáveis, conforme ilustrado na Figura 2.14.

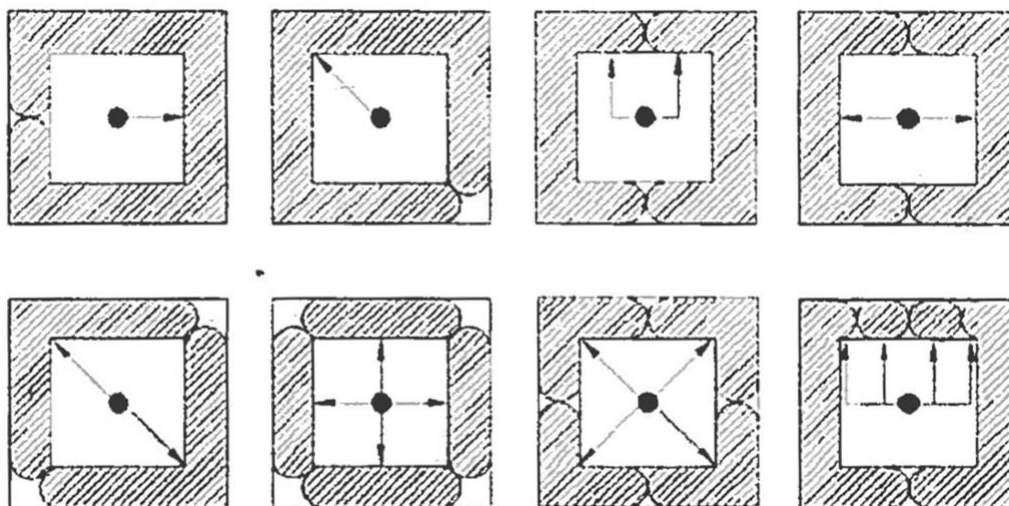


Figura 2.14 – Alterações das linhas de soldadura [8].

2.4.6 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é constituído por uma série de canais geralmente maquinados numa ou mais placas do molde pelo qual o fundido é transportado desde o bico de injeção até cada zona moldante.

Neste Estado da Arte não se tratará o tema dos sistemas de ataques quentes, pois irão aumentar o custo do molde em estudo na dissertação que, sendo para uma produção de um lote inferior a 500 peças, não justifica esse custo acrescentado.

O fundido entra no molde pelo jito que pode comunicar diretamente com a zona moldante (alimentação/injeção direta) ou ramificar-se num sistema de canais de alimentação como na

Figura 2.15, fazendo a ligação do jito às zonas moldantes. A entrada do polímero fundido nas zonas moldantes é feita através dos ataques.

A Figura 2.15 mostra as diversas partes constituintes de um sistema de alimentação típico.

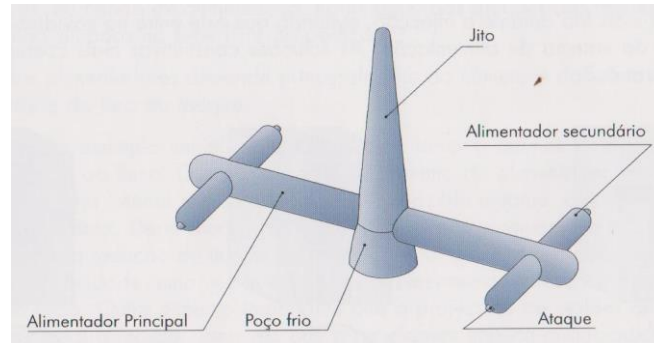


Figura 2.15 –Configuração de um sistema de alimentação (frio) [1].

2.4.6.1 Jito

O jito é um canal tronco-cônico divergente, com um ângulo de abertura de 2 a 5°, que liga o bico da máquina de injeção aos canais de alimentação ou diretamente à zona moldante. Esta conicidade é necessária para facilitar a sua extração.

Normalmente, este canal não é maquinado diretamente nas chapas do molde, mas num componente chamado injetor principal. Este componente deve ter um diâmetro de entrada ligeiramente superior e possuir uma concavidade com raio superior ao do bico da máquina de injeção.

O injetor principal (Figura 2.16) apresenta algumas vantagens como por exemplo a possibilidade de substituição em caso de desgaste. Este desgaste pode ser causado pelo próprio fluxo de material, especialmente se forem injetados materiais reforçados com fibras e/ou pelo encosto repetido ao bico de injeção da máquina.

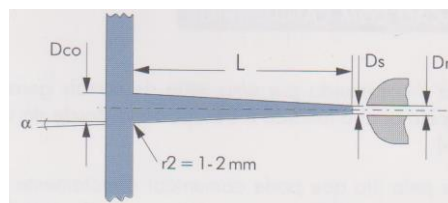


Figura 2.16 – Aspecto de um injetor [1].

De modo a garantir a extração do jito é frequente considerar um puxador do jito no lado da extração. Durante a abertura do molde, a contra-saída obriga a saída do jito do injetor. Em alguns casos, a maquinação da contra-saída do lado da extração cria um poço-frio, o qual retém o

material mais frio durante a injeção, evitando que este entre na cavidade ou obstrua as restantes zonas do sistema de alimentação. Na Figura 2.17 encontram-se alguns exemplos de puxadores de jito.

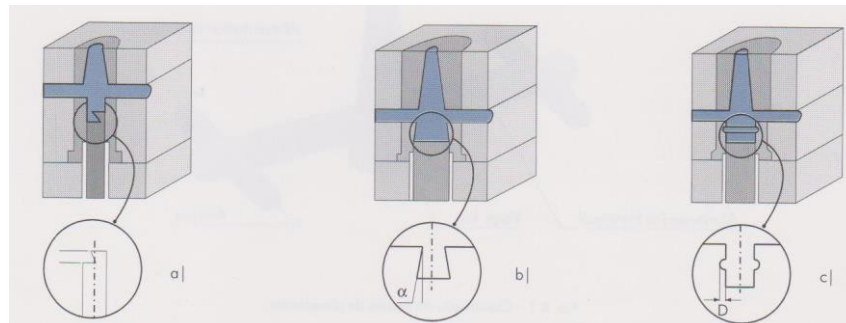


Figura 2.17 - Puxadores de jito [1]

2.4.6.2 Canais de Alimentação

Os canais de alimentação, ou alimentadores, ligam o jito aos ataques das zonas moldantes e, em moldes simples, estão situados na superfície de junta da bucha e cavidade.

A disposição dos canais de alimentação depende principalmente do número e da forma das zonas moldantes, do tipo de molde e do tipo de ataque.

Os canais de alimentação podem ser classificados quanto à secção transversal, podendo ser circulares, trapezoidais, trapezoidais modificados, semi-circulares ou retangulares, conforme ilustrado na Figura 2.18.

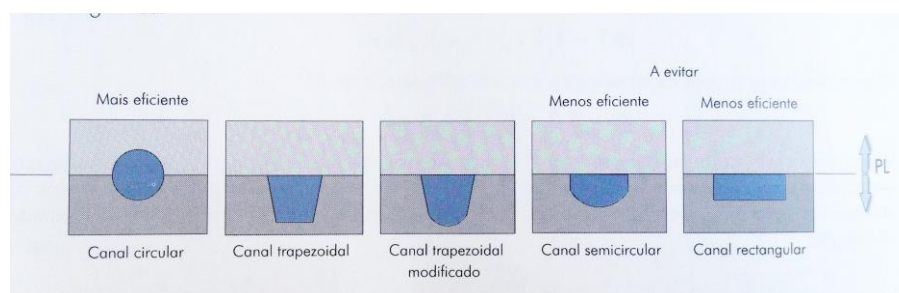


Figura 2.18 – Geometrias utilizadas nos canais de injeção [1]

O percurso destes canais deve ser o menor possível, de modo a que haja o mínimo de perda de temperatura que resulta num aumento da viscosidade. A Figura 2.19 representa como se comporta o fundido dentro dos canais, correspondendo à teoria da camada limite.

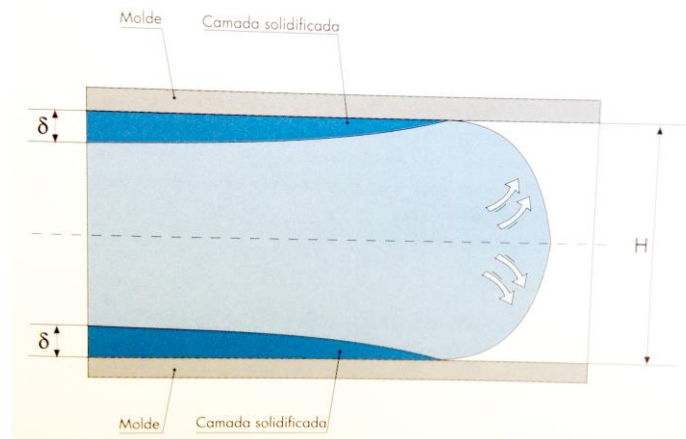


Figura 2.19 – Frente de fundido num canal de alimentação [1]

Os moldes com mais do que uma cavidade, destinados à produção de peças distintas durante o mesmo ciclo de injeção, são chamados moldes família. Por vezes, o tempo de enchimento de cada cavidade é diferente, originando diferenças de compactação. Ou seja, no momento em que uma das cavidades está completamente cheia, é compactada durante o enchimento da(s) outra(s). As diferenças de contração de cada peça conduzem a variações dimensionais e por isso, o balanceamento do enchimento é muito importante neste tipo de moldes.

O balanceamento pode ser conseguido através da variação do diâmetro de cada alimentador/ataque induzindo diferenças intencionais de resistência ao fluxo. Os efeitos de cada variação podem ser simulados através da utilização de um software apropriado de previsão de enchimento.

Na Figura 2.20, é possível ver duas peças diferentes para o mesmo molde. Como o seu volume é bastante diferente, não se deve colocar canais de alimentação iguais. Portanto deve ser alterado para o tipo da última imagem.



Figura 2.20 – Ajuste de canais de alimentação [1]

Outra forma de proporcionar um enchimento simultâneo de todas as cavidades (no caso de moldes com cavidades iguais) é fazer com que o fundido percorra sempre a mesma distância desde o jito até cada uma das zonas moldantes (Figura 2.21).

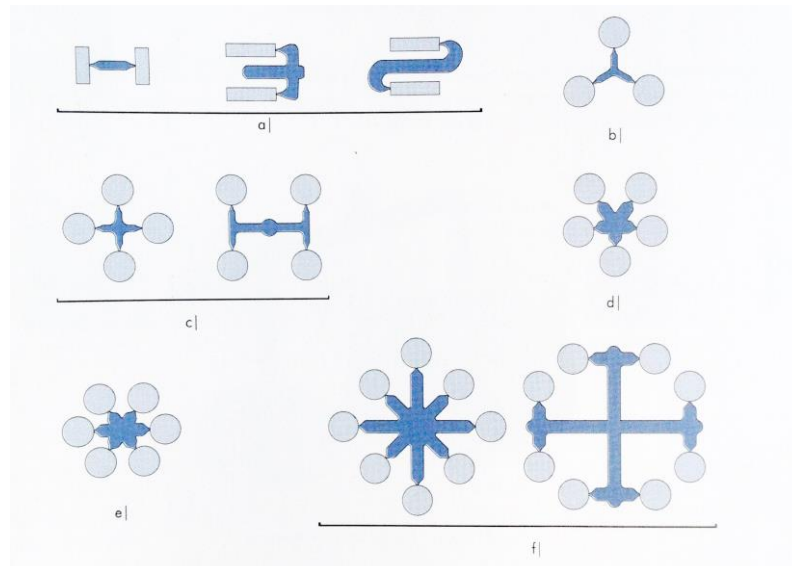


Figura 2.21 – Equilíbrio dos canais de alimentação [1]

No entanto, as disposições dos canais de alimentação mais utilizadas são as seguintes:

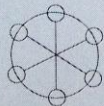
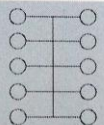
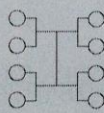
	Vantagens	Desvantagens
Disposição circular 	Comprimento de fluxo igual para todas as cavidades	Maior limitação de espaço em função do número de cavidades
Disposição em série 	Maior espaço para acomodar as diversas cavidades	Os diferentes comprimentos de fluxo desde do bico de injeção até cada cavidade podem casuar problemas de enchimento. O balanceamento pode ser feito recorrendo a ferramentas de CAE.
Disposição simétrica 	Comprimento de fluxo igual para todas as cavidades	O sistema de alimentação normalmente é mais volumoso.

Figura 2.22 – Vantagens e desvantagens dos tipos de disposição dos canais de alimentação.

[1]

No momento do projeto, existem algumas medidas a ter em conta no que respeita aos canais de alimentação, entre elas:

- Utilizar um ângulo de saída entre 5° e 15° nos canais trapezoidais;
- Diâmetro mínimo de 1,5mm;
- Devem ser polidos de modo a facilitar o fluxo e a extração;

- Colocar extratores ao longo do percurso do sistema de alimentação;
- Colocar um poço frio em todas as interseções dos canais, de forma a captar o material mais frio que se encontra na frente de fluxo (Figura 2.23).

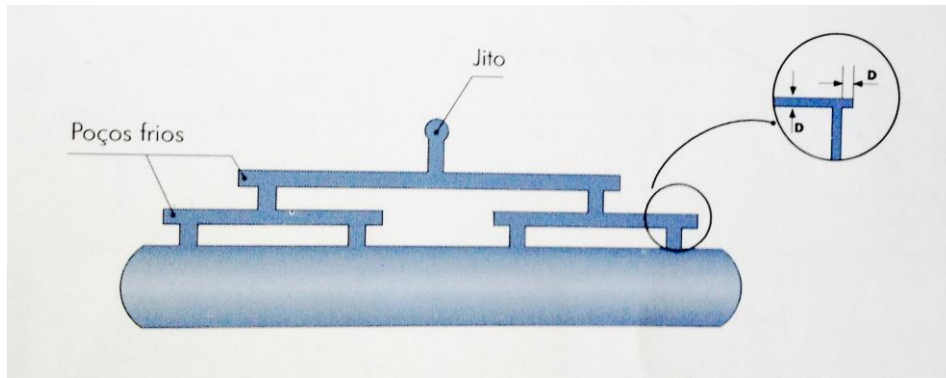


Figura 2.23 – Ilustração de poços frios [1]

2.4.6.3 Ataque

O ataque é uma constrição entre os canais de alimentação e as cavidades e tem como finalidades:

- Sujeitar o fundido a uma taxa de corte suficientemente elevada para que o aquecimento resultante da dissipação viscosa mantenha essa passagem, de pequena secção, aberta durante o enchimento e a fase de pressurização. No entanto, o aumento excessivo da temperatura poderá provocar a degradação do material. O ataque deve solidificar a tempo de permitir que o cilindro da máquina de injeção possa recuar sem perigo de refluxo do material;
- Facilitar o controlo do enchimento, principalmente em moldes de várias cavidades ou de zonas moldantes com mais de um ataque;
- Permitir a separação fácil entre a peça e o sistema de alimentação (eventualmente automática), não deixando uma marca muito pronunciada.

A posição dos ataques deve ser tal que permita controlar/minimizar/evitar alguns defeitos de enchimento. Assim sendo a sua localização deve ser:

- Preferencialmente nas zonas mais espessas da peça. De forma a evitar vazios ou chupados nas peças moldadas;
- De modo a garantir um enchimento equilibrado da moldação;
- De modo a evitar ou minimizar a fragilidade das linhas de soldadura;
- De modo a minimizar as prisões de ar;
- O mais afastado das zonas de hesitação devido à diferença de resistência ao fluxo;
- De forma a evitar o efeito de jacto.

O ataque pode ser de vários tipos:

2.4.6.3.1 Ataque de jito direto

Este tipo de injeção pode ser utilizado em moldes de uma só cavidade. Uma das vantagens é a queda de pressão no sistema de alimentação ser relativamente baixa. Além disso, o tempo de compactação normalmente depende do tempo de solidificação da moldação, e não do tempo de solidificação do sistema de alimentação. Por isso, este tipo de injeção deve ser utilizado para a injeção de peças com grande espessura ($>4\text{mm}$) de modo a garantir uma compactação adequada. A desvantagem principal é dificuldade de separação do jito sem deixar marcas significativas na superfície da moldação.



Figura 2.24 – Ataque de jito direto [1]

2.4.6.3.2 Ataque lateral ou à junta

Este tipo de ataque é mais comum e tem, geralmente, uma secção retangular. As vantagens deste tipo de ataque são:

- A facilidade de maquinagem e consequente baixo custo;
- A grande exatidão dimensional e a facilidade de variação das suas dimensões. Assim, a velocidade de enchimento da cavidade pode ser controlada independentemente do tempo de solidificação do ataque e permitir moldar todos os materiais comum;
- Pode ser facilmente alterado durante o ensaio do molde.



Figura 2.25 – Ataque à junta [1]

2.4.6.3.3 Ataque em lâmina

O ataque em lâmina é utilizado principalmente em peças planas, a alimentação é feita através de uma fenda ao longo do bordo da peça permitindo, assim, um enchimento uniforme da cavidade (Figura 2.26). Tem o inconveniente de ser o mais difícil de partir e deixa uma marca visível na peça.

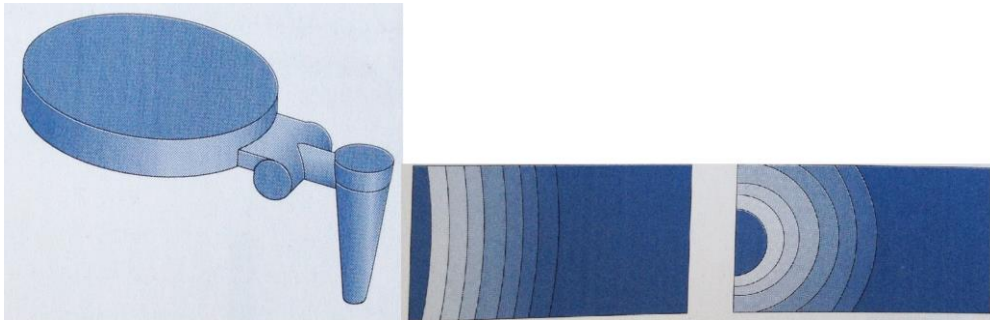


Figura 2.26 – Ataque em lâmina e enchimento uniforme da peça [1].

2.4.6.3.4 Ataque em leque

Neste tipo de ataque a alimentação é feita através de uma fenda em vez de um orifício. Permite um enchimento mais uniforme do que o ataque lateral, mas menos uniforme do que o ataque em lâmina, constituindo por isso, uma solução de compromisso entre os dois tipos de ataque referidos. É utilizado com em peças com grandes superfícies e paredes finas. Como permite criar uma frente de fluxo uniforme, em alguns casos, minimiza o efeito de empeno devido à orientação molecular. Por estas razões foi este o tipo de ataque escolhido para o molde em estudo nesta Dissertação.

A sua largura (W) deve variar entre 6,4mm e 25% da largura da moldação. Já a sua espessura máxima (h) deve ser cerca de 75% da espessura nominal da moldação.

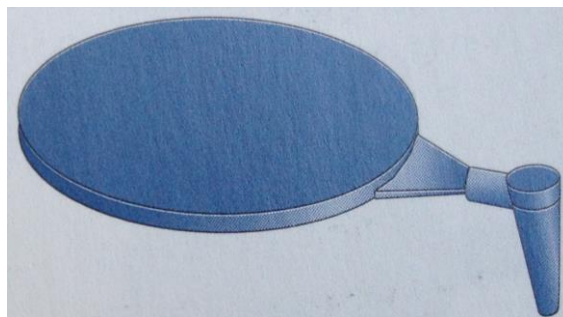


Figura 2.27 – Ataque em leque [1].

2.4.6.3.5 Ataque em diafragma

O ataque em diafragma pode ser utilizado em moldações com geometria circular para reduzir a fragilidade das peças devido a linhas de soldadura. É semelhante ao ataque em anel, mas neste caso a alimentação é feita internamente.



Figura 2.28 – Ataque em diafragma [1].

2.4.6.3.6 Ataque em anel

O ataque em anel também pode ser utilizado para moldações com geometria circular. Tal como a injeção em diafragma, uma das vantagens deste tipo de injeção é a uniformidade da espessura ao longo do perímetro da moldação, permitindo o enchimento da cavidade com um fluxo paralelo e sem linhas de soldadura.

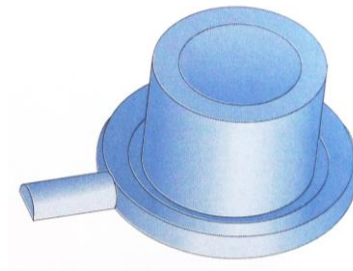


Figura 2.29 – Ataque em anel [1].

2.4.6.3.7 Injeção submarina

A injeção submarina, geralmente de forma circular, é uma variante do ataque lateral e é usado em desgitação automática em moldes de duas placas, sem necessidade de recurso ao molde de três placas. Este ataque tem o inconveniente de deixar uma marca muito visível na parte lateral das peças, principalmente em peças coloridas (a deformação plástica que o material sofre quando se remove o jito leva ao aparecimento de uma marca esbranquiçada na zona do ataque), o que em muitos casos pode comprometer a sua aplicação.

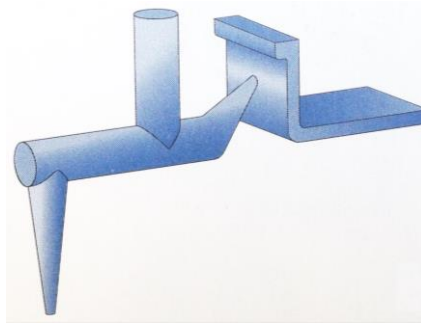


Figura 2.30 – Injeção submarina [1]

2.4.6.3.8 Injeção submarina curva

Este tipo de ataque é uma variante do ataque submarino (também chamado de ataque em corno), com a vantagem de permitir esconder a marca do ataque. Tem, no entanto, a grande desvantagem de uma maior complexidade de construção e um maior risco de uma extração deficiente (devido à grande deformação que o material tem de sofrer durante a extração, podendo este partir ficando uma parte dentro do ataque com o seu consequente “entupimento”).

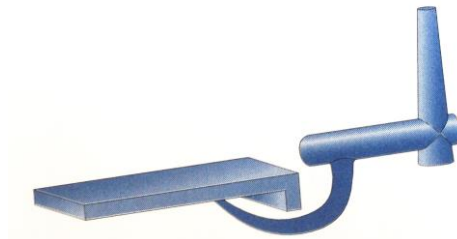


Figura 2.31 – Injeção submarina curva [1].

2.4.6.3.9 Injeção num extrator

Este tipo de ataque é uma variante do anterior e permite esconder a marca do ataque. A injeção num extrator tem menor complexidade de construção e menor risco de extração insuficiente. Apresenta, no entanto, o inconveniente de deixar parte do canal de alimentação na peça.



Figura 2.32 – Injeção num extrator [1].

2.4.7 Sistema de Fugas de Gases

Este sistema, muitas vezes negligenciado, é fundamental para um funcionamento correto do molde. Durante o enchimento do molde é muito importante que na cavidade do molde existam saídas de gases eficientes, de forma a permitir que o ar saia quando a massa fundida entrar nas zonas moldantes.

As saídas de gases deverão estar localizadas nas direções de fluxos do material. Para isso, o molde deve ser dotado de um sistema de escape de gases que permita não só a eficiente saída do ar, mas também de eventuais elementos voláteis libertados pelo fundido.

Saídas ineficientes ou mal localizadas poderão resultar num mau preenchimento da peça, linhas de soldaduras, contração irregular da moldação e queimados na peça. Esses problemas tornam-se mais críticos em peças de paredes finas quando se usam velocidades de injeção altas.

Na maioria dos casos o ar pode escapar pelo plano de partição do molde. Contudo, devido à elevada precisão de ajustamento entre as duas partes do molde, o escape de gases por este plano não é eficiente, devendo ser maquinados pequenos rasgos (Figura 2.33) para facilitar a sua saída.

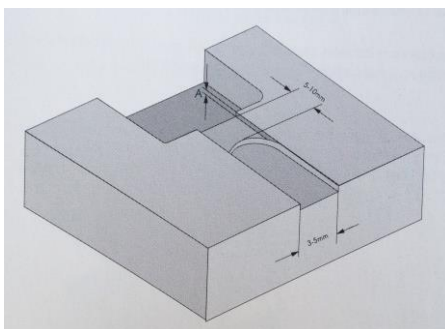


Figura 2.33 – Rasgos maquinados para fugas de gases [1]

Estes rasgos para escape de gases devem ser colocados ao longo de toda a peça, sendo particularmente importantes nas zonas onde se dá o fim do enchimento ou a confluência de frentes de fluxo. A sua localização pode, em peças mais complexas, ser de difícil determinação. Para ultrapassar este problema recomenda-se o uso de software de previsão de enchimento, que normalmente permitem a obtenção de boas aproximações. A profundidade do canal deve permitir a saída do ar, mas ser suficientemente pequena para que o fundido não possa sair criando rebarba. Na Tabela 2.2 apresentam-se as profundidades típicas para alguns dos plásticos mais comuns.

Tabela 2.2 – Profundidades típicas de rasgos para fugas de gases para alguns plásticos mais comuns. [1]

Material	ABS	POM	PMMA	PA	PC	PE	PP	PPO	PPS	PS	PVC
Profundidade (a) (mm)	0,051 a 0,076	0,013 a 0,038	0,038 a 0,076	0,013 a 0,025	0,025 a 0,076	0,025 a 0,051	0,025 a 0,051	0,025 a 0,051	0,013 a 0,025	0,025 a 0,076	0,013 a 0,051

No caso de materiais com aditivos retardadores de chama, é recomendado a construção de saídas de gases contínuas, mais eficientes que as convencionais.

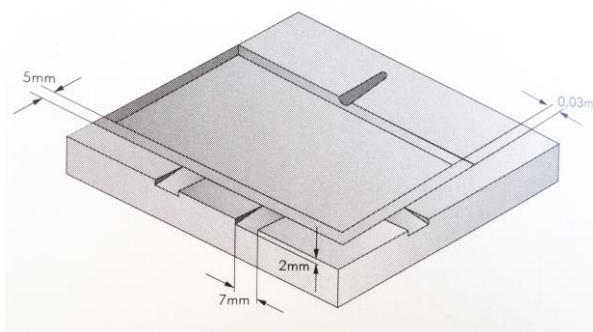


Figura 2.34 – Rasgo de fugas de gases em torno de toda a peça [1].

Contudo, em alguns casos, os gases podem ficar presos em áreas onde não é possível fazer o escape de gases pelo plano de partição da peça, por exemplo, como no caso representado na Figura 2.35.

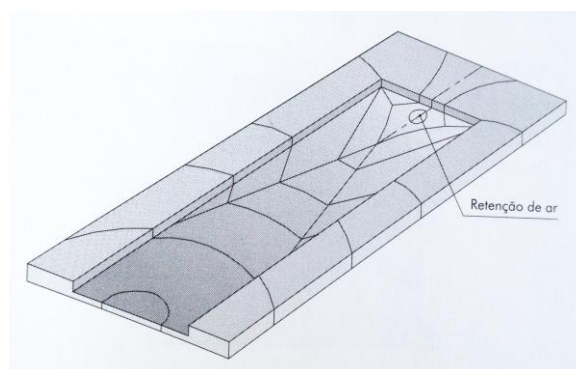


Figura 2.35 – Exemplo de pontos em que não é possível criar fugas de gases [1].

Nestes casos tem de se recorrer a outras alternativas como, por exemplo, a utilização de:

2.4.7.1 Extratores

Esta solução é particularmente recomendada em peças com nervuras. Como estas devem ter uma espessura menor que a peça, para evitar chupados, são, normalmente, as últimas zonas a encher. A colocação de extratores, não só promove o escape de gases, devido à folga existente, como também facilita a sua extração.

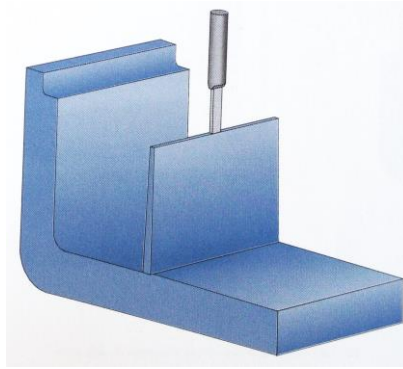


Figura 2.36 – Extratores a funcionar como fugas de gases [1].

2.4.7.2 Postiços

Podem ser uma espécie de “falsos extratores” ou terem formas especiais como, por exemplo, serem constituídos por lâminas com fendas para o escape de gases.

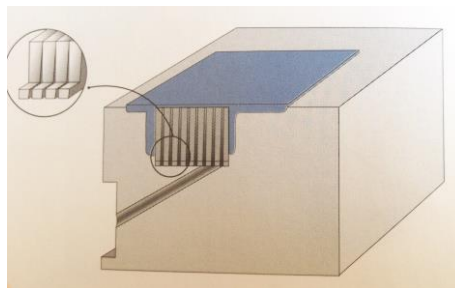


Figura 2.37 – Postiços para fugas de gases [1].

2.4.7.3 Materiais especiais

Utilização de materiais especiais como, por exemplo, o aço poroso.

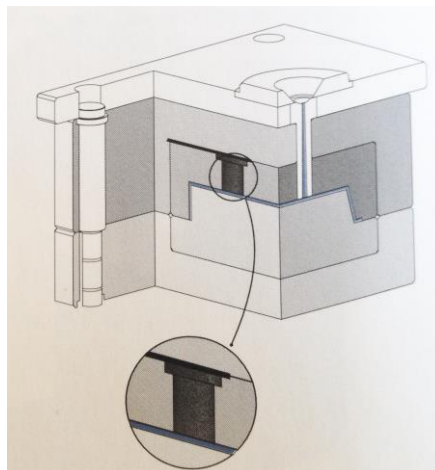


Figura 2.38 – Aço poroso para fugas de gases [1]

2.4.8 Sistema de Arrefecimento

O princípio fundamental da moldação por injeção consiste em forçar um material previamente aquecido (fundido) a entrar, sob pressão, num molde, onde é arrefecido até uma temperatura que permita que ganhe a rigidez suficiente para que possa ser extraído mantendo a forma da moldação, isto é, da peça que se quer produzir.

Idealmente, na injeção de materiais poliméricos, o molde deveria estar à temperatura do fundido durante a fase de injeção e, no momento da extração, o molde e as peças deveriam estar à temperatura ambiente.

Nestas condições, seria necessária uma pressão de injeção muito reduzida e as peças seriam isotrópicas devido ao modo muito lento como se faria o arrefecimento. Ter-se-ia aquilo a que se poderia chamar “peças perfeitas”. Infelizmente, o seu preço seria proibitivo.

Assim, por razões económicas, deve-se produzir as peças à maior cadência possível. Sendo, por isso, o arrefecimento do polímero fundido um aspecto fundamental no funcionamento do molde, procurando-se conjugar a rapidez do ciclo e o melhor nível de propriedades das peças com as especificações técnicas e económicas do produto.

Tipicamente, o tempo de arrefecimento é cerca de 50%, ou mais, da duração total do ciclo de injeção, sendo mais longo no caso de materiais semi-cristalinos que nos materiais amorfos. Isto mostra bem a importância que o sistema de controlo de temperatura tem no correto funcionamento do molde.

O arrefecimento do material injetado é feito por transferência de calor para as superfícies moldantes (que estão a uma temperatura bastante inferior) e através da massa do molde.

Assim, a maneira como se faz o arrefecimento deve ser controlada, não só em termos do gradiente de temperatura do fluido refrigerador, mas também da sua uniformidade na superfície da zona moldante, de forma a evitar empenos nas peças.

Para facilitar, acelerar e controlar o processo de transferência de calor, são maquinados furos de passagem para um fluido refrigerante perto das zonas moldantes. Estes furos, também conhecidos por “linhas de água”, por a água ser o fluido de refrigeração mais frequente (e mais barato), constituem o sistema de controlo de temperatura.

A adopção da designação de “sistema de arrefecimento” ou “sistema de controlo de temperatura” depende da perspectiva em análise, pois do lado da peça será sistema de arrefecimento e do lado do molde será de controlo de temperatura, pois este usualmente será aquecido para temperaturas acima da temperatura ambiente. Daqui em diante chamar-se-á sempre sistema de arrefecimento, como é chamado na indústria. Também quando se refere a linhas de água, é

devido à sua utilização mais comum, pois poderá também ser utilizado óleo, no caso de moldes aquecidos, como é o caso em estudo neste Dissertação.

No caso de ter o molde mais quente, obtém-se um fluxo do fundido facilitado, peças com melhor aspecto superficial e menores tensões, logo, de melhor qualidade, mas com maior tempo de arrefecimento (o que implica maiores tempos de ciclo e, conseqüentemente, peças mais caras). Por outro lado, se se tiver o molde mais frio, obtém-se um fluxo do fundido mais dificultado, podendo mesmo não chegar a preencher os pontos mais afastados da impressão (moldações incompletas), peças com pior aspecto superficial, maiores tensões internas e menores tempos de arrefecimento (ciclos mais rápidos e peças mais baratas).

A otimização de um sistema de arrefecimento consiste assim em encontrar um compromisso entre estas duas situações.

Na Figura 2.39 representa-se, esquematicamente, um sistema de arrefecimento simples.

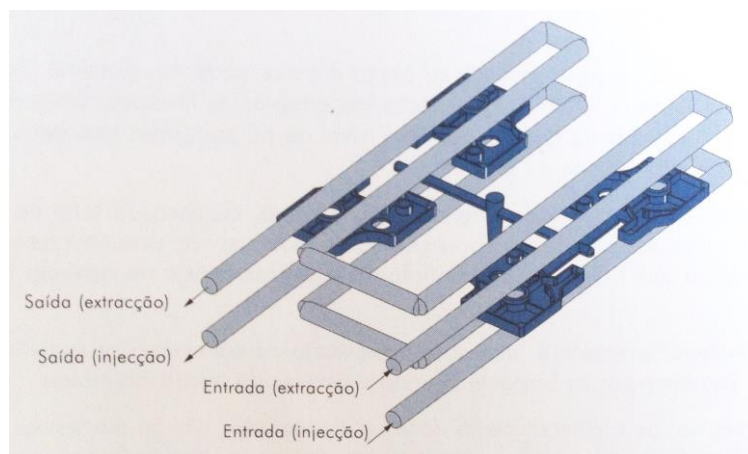


Figura 2.39 – Exemplo de um sistema de arrefecimento simples [1].

O sistema de arrefecimento deve ser maquinado quer na zona da cavidade, quer na zona da bucha, de forma a controlar a temperatura das duas metades do molde que, por vezes, se poderá pretender que tenham temperaturas diferentes.

Para o projeto dos sistemas de arrefecimento, há alguns aspetos a ter em conta, entre eles:

- Considerar circuitos independentes e simétricos relativamente à zona ou zonas de enchimento do molde ou de cada cavidade e acompanhar, o melhor possível, a forma das peças.
- O seu percurso não deve ser tão longo que permita o aquecimento do fluido de refrigeração em mais de 5°C. É melhor ter vários circuitos independentes do que um único muito longo-
- Todos os circuitos de refrigeração devem ser numerados para fácil e clara identificação, quer no desenho do molde, quer em gravações a marcar no exterior do próprio molde.

Sendo *IN X* as entradas e *OUT X* as saídas, em que *X* representa o número do circuito. Assim, evitam-se enganos de ligações quando as entradas e saídas do mesmo circuito se encontram dispersas.

- O fluido de refrigeração que circula no molde em circuito fechado deve passar um termoregulador e por um regulador de caudal. O sentido deve ser: termoregulador, entrada no molde, saída do molde, regulador de caudal, termoregulador.
- Evitar a localização de entradas e saídas de refrigeração no topo do molde. E evitar também a localização do lado do operador.
- Fazer as ligações do sistema de refrigeração com peças normalizadas de acordo com o mercado a que o molde se destina, de preferência do tipo de ligação rápida e em caixas maquinadas no interior do molde, para que não fiquem salientes.
- Evitar o uso de ligações de água com vedantes (*O-rings*). No entanto, quando as linhas de água são maquinadas na superfície de postigos, ou passam de uma chapa para outra ou para um postigo, deve-se usar tipos normalizados, resistentes ao calor e seguir rigorosamente as indicações do fornecedor quanto a dimensões para as respectivas caixas.
- Em média, as linhas de água deverão estar a uma distância mínima de 4mm dos extratores ou de qualquer furo que lhes seja perpendicular (guias, parafusos, etc.) e a 15mm das superfícies moldantes ou do exterior das chapas do molde.

A arquitetura dos sistemas de refrigeração depende principalmente da forma da peça e das suas dimensões. A refrigeração do “exterior” da peça não representa grandes problemas, uma vez que o “espaço” se pode criar, já o mesmo não se pode dizer do arrefecimento do “interior” das peças em que o espaço está definido, e são as zonas que necessitam de uma maior remoção de calor. Este sistema não funciona sozinho no mesmo espaço do molde, portanto terá de ser projetado juntamente e em consonância com o sistema de alimentação (na cavidade) e com o sistema de extração (na bucha). É assim necessário que o projeto do sistema de refrigeração seja uma solução de compromisso entre o ideal e o que é possível de realizar. No Anexo A encontram-se alguns tipos de sistema de arrefecimento utilizados.

2.4.9 Sistema de Extração

Durante o processo de moldação por injeção, o plástico fundido é injetado para o molde fechado e frio com pressões relativamente elevadas (fase de injeção). As forças elevadas exercidas pela unidade de fecho mantêm o molde fechado, evitando que o material possa sair da zona moldante. Após a injeção e para compensar a densificação e consequente contração, é injetado mais material para a cavidade a pressão constante até que o ataque solidifique. Depois desta fase, o material arrefece até atingir uma rigidez suficiente que permita a sua extração do molde. Após estas fases, o molde abre.

No intervalo entre a abertura e o fecho do molde a peça é extraída. O ideal seria que a seguir à abertura do molde a peça pudesse cair por gravidade. Contudo, devido à contração e consequente adesão e às contra-saídas, a peça tende a ficar presa no molde, geralmente, na bucha, e são necessárias soluções específicas para a extrair. O sistema de extração requer assim um projeto próprio, tão mais complexo quanto mais necessários forem longos cursos ou elevadas forças de extração devido a uma excessiva rigidez ou contração de alguns termoplásticos.

O sistema de extração é normalmente, atuado pela máquina de injeção. Se este método não for possível, o sistema de extração pode ser atuado autonomamente por um sistema hidráulico ou pneumático, devidamente sincronizado com a abertura do molde.

A crescente utilização de robôs para a extração/manipulação das peças pode levar a pensar que este sistema está a cair em desuso. No entanto, isso não corresponde à verdade já que, por si só, o robô não consegue extrair a peça devido às elevadas forças necessárias para a extração e às eventuais contra-saídas que a peça possa ter. Assim, terá que existir um sistema de extração que, eventualmente, não faça uma extração completa (para que a peça possa cair por gravidade), mas uma extração parcial (libertar as contra-saídas e fazer o “deslocamento” da peça da bucha) para que, então sim, o robô possa “pegar” na peça.

Na Figura 2.40 representa-se um sistema de extração simples e a sua constituição.

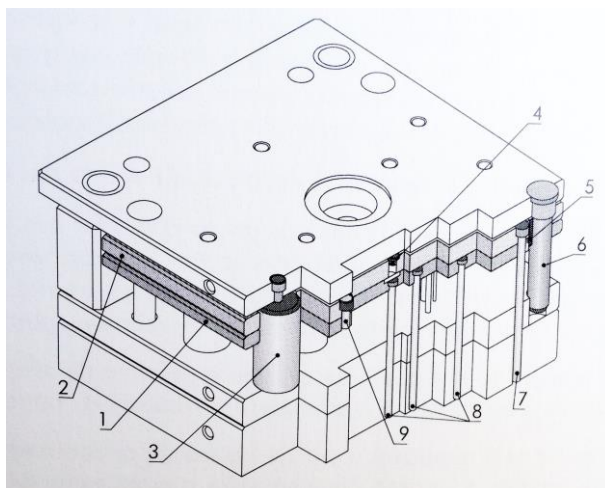


Figura 2.40 – Componentes de um sistema de extração comum [1].

1. Placa dos extratores – Posiciona os extratores;
2. Placa de aperto dos extratores – Promove o acionamento dos extratores;
3. Suportes – Apesar de não fazerem realmente parte do sistema de extração, estão localizados na “caixa da extração”, servindo para diminuir a flexão da placa das buchas e para a reforçar devido às pressões desenvolvidas nas fases de injeção e pressurização do ciclo de injeção;

4. Botões de encosto – Fazem a separação das placas dos extratores da placa de aperto dos extratores, permitindo que o seu acabamento superficial possa ser menor. Além disso, permitem que eventuais sujidades que se venham a acumular nesta zona, durante a produção, não prejudiquem o funcionamento deste sistema;
5. Casquilhos da extração;
6. Guias da extração – Normalmente são quatro, servindo para guiar o movimento das placas dos extratores;
7. Pernos de retorno – Em geral, são quatro e promovem o recuo das placas dos extratores, assegurando que os extratores estejam na sua posição correta antes do início da injeção no ciclo seguinte. Estes pernos são iguais aos extratores cilíndricos só que, normalmente, são de maior diâmetro;
8. Extratores (ejetores) – Empurram diretamente a peça e devem atuar em zonas onde tenha havido consolidação suficiente do material e as marcas provocadas não prejudiquem a estética da peça. Em regra, a área de contato peça-extrator deve ser tão grande quanto possível e ter em conta a força necessária para a sua extração;
9. Parafusos – Promovem a união das placas dos extratores.

Deve referir-se ainda que as peças, apresentando recessos, saliências laterais ou zonas roscadas, não são possíveis de desmoldar por processos tão simples (uma direção de extração). Nestes casos são necessárias duas ou mais direções de extração, pelo que é necessário recorrer a extratores especiais ou a elementos móveis.

No que diz respeito ao projeto, há algumas regras que se devem ter em consideração:

- Os extratores devem ser colocados nas zonas das peças a moldar que ofereçam maior resistência à fratura ou que constituam melhor apoio à extração. Devem ter um diâmetro tão grande quanto possível e um comprimento de contato com o furo inferior a 20mm. O ajustamento entre o extrator e o furo deve impedir a formação de rebarba, geralmente H7-g6;
- Poderá ser utilizado um aro extrator ou barras extratoras nas peças de grande profundidade e pouca saída ou para evitar marcas de extratores;
- O curso de extração deve ser suficiente para que possibilite a queda livre das peças;
- Deve haver o maior cuidado para que não existam peças ou áreas do molde que interfiram com a queda livre das peças;
- Nos moldes em que exista risco de interferência de extratores com movimentos laterais, a extração deverá ter um sistema de segurança para o retorno antecipado, que não seja acionado por molas;
- Sempre que possível, os extratores e componentes de balancés deverão ter uma secção circular, diminuindo os custos de produção e o risco de desgaste prematuro;

- Os extratores com posição definida devem ser impedidos de rodar. A restrição deste movimento deve ser garantida através da maquinação de um rasgo e da colocação de um pino;
- Nos casos em que os movimentos possam colidir com a extração é aconselhável considerar mecanismos elétricos ou mecânicos no molde que evitem a sua danificação.

Dado que no molde em estudo nesta dissertação os mecanismos de extração são simples, apenas vão ser apresentados os tipos de extração simples, pois na extração de peças que não apresentam contra-saídas ou saídas negativas, a extração pode fazer-se simplesmente pelo avanço as placas extratoras que movimentam os dispositivos de extração que empurram as peças.

Os extratores, de um modo geral, servem para extrair as peças e, quando necessário, o sistema de alimentação. Estes componentes permitem exercer uma força localizada, sendo muito úteis para a desmoldação de pequenas saliências, nervuras ou encaixes da peça.

2.4.9.1 Extratores cilíndricos

Os extratores cilíndricos são dos componentes mais utilizados para a extração de peças em plástico. Normalmente, estes componentes são fixos por uma extremidade nas placas de extração, enquanto que a outra se encontra em balanço e em contato com a peça. Quando as placas extratoras avançam pela ação do sistema de ejeção da máquina, os extratores empurram uma ou mais moldações e, por vezes, o sistema de alimentação.

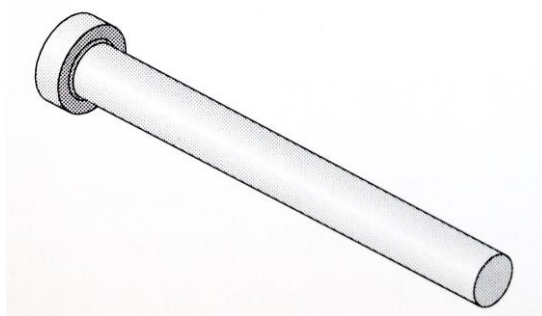


Figura 2.41 – Extrator cilíndrico [1].

A Figura 2.42 representa, de uma forma simplificada, uma parte de um molde com extratores cilíndricos, para a extração das peças e do sistema de alimentação (jito).

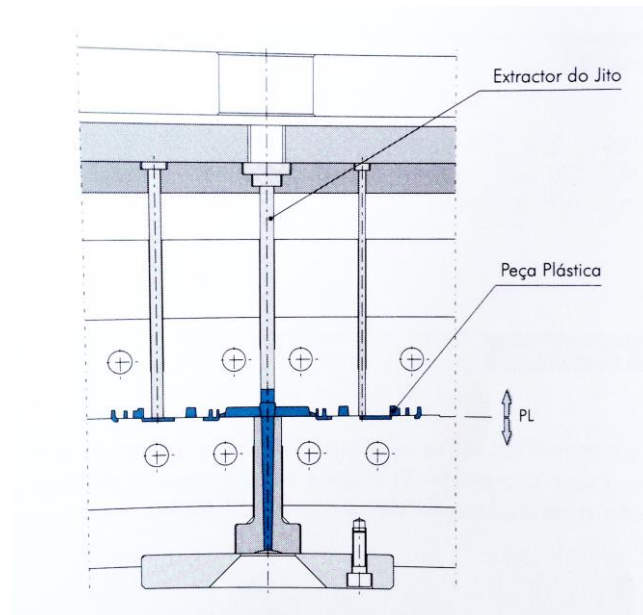


Figura 2.42 – Vista em corte de um molde com extratores cilíndricos [1].

Quando se utilizam estes extratores, as peças apresentam marcas circulares na superfície devido ao ajuste entre o extrator e o furo e/ou devido à pressão de contato durante a extração (Figura 2.43). Quando as marcas nas peças não são aceitáveis é possível, em alguns casos, maquinar uma câmara adicional à cavidade do molde onde o extrator pode atuar. Posteriormente, esta parte suplementar em plástico pode ser removida de modo a que a moldação não apresente nenhuma marca dos extratores.

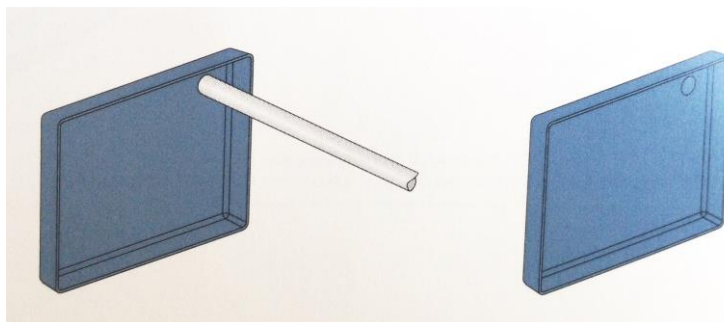


Figura 2.43 – Marcas causadas nas peças pela utilização de extratores circulares [1].

Os extratores rebaixados são uma variante dos extratores cilíndricos e são utilizados principalmente quando estes têm que ter pequeno diâmetro (devido ao espaço disponível) e grande comprimento. Nestes casos, a força exercida nos extratores, quer durante a injeção quer durante a extração, poderia provocar a sua encurvadura. Assim, os extratores rebaixados apresentam duas zonas com diâmetros diferentes: junto à peça um pequeno diâmetro, necessário pelo espaço disponível para a atuação do extrator e, junto à cabeça, um diâmetro maior para lhe conferir resistência.

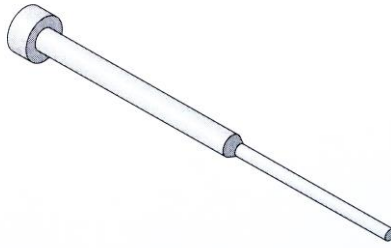


Figura 2.44 –Extrator rebaixado [1].

2.4.9.2 Extratores de lâmina

Os extratores de lâmina, que apresentam uma secção retangular na extremidade em contato com a moldação, são frequentemente utilizados para extrair peças com contornos ou nervuras estreitas, como ilustrado na Figura 2.45.

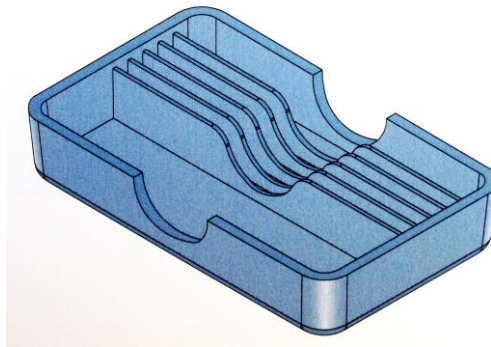


Figura 2.45 – Peça com nervuras, na qual é recomendada a utilização de extratores de lâmina [1].

No caso de peças com nervuras, estes extratores são particularmente úteis por dois motivos principais:

- As nervuras são, normalmente, zonas onde a peça fica muito agarrada ao molde e, conseqüentemente, a força de extração requerida é elevada. Assim, para que a peça não seja deformada pelo extrator, este deve ter uma área de contato com a peça tão grande quanto possível, o que não se consegue com um extrator cilíndrico (que terá que ter um diâmetro reduzido e logo, pequena área de conato com a peça, devido às dimensões da nervura). Os extratores de lâmina, devido à sua forma retangular, permitem aumentar a área de contato extrator/peça, diminuindo assim o risco de deformação da peça;
- Como as nervuras devem ter uma espessura menor que a das paredes da peça, são normalmente as últimas partes a encher, para evitar chupados, dificultando ou impossibilitando a saída do ar, levando ao aparecimento de queimados ou enchimentos

incompletos. A folga existente entre os extratores e os furos onde estes estão alojados permite o escape do ar, evitando os defeitos anteriormente apontados.

Estes extratores devem ser montados em posições, de modo a facilitar o processo de maquinação da caixa. Isto também facilita as operações de acabamento e montagem. Dependendo das dimensões, podem ser componentes com alguma fragilidade. Por isso, deverão ser guiados por casquilhos, quer na zona circular, quer na zona retangular do extrator.



Figura 2.46 – Extrator de lâmina [1].

2.4.9.3 Extratores tubulares

Os extratores tubulares servem para extrair secções tubulares (por exemplo, “castelos”) sem necessidade de reforçar a peça, alterando a sua espessura ou colocando nervuras adicionais.



Figura 2.47 – Extrator tubular [1].

Na Figura 2.48 representa-se uma parte de um molde onde são usados extratores tubulares para a extração da peça.

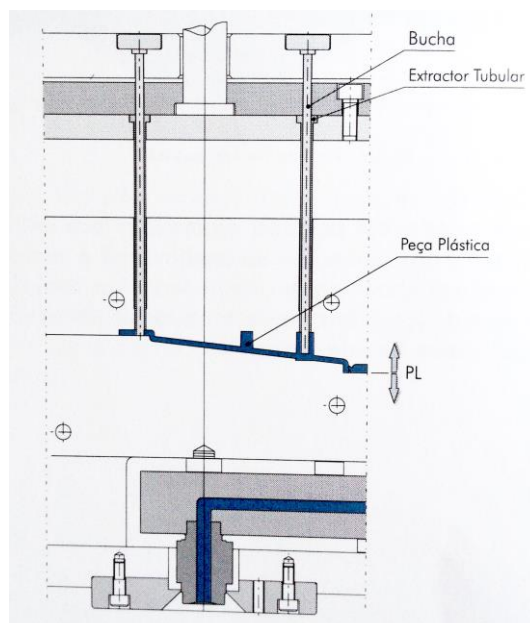


Figura 2.48 – Vista em corte de um molde com extrator tubular [1].

A utilização deste tipo de extratores, em situações como a apresentada, tem duas vantagens principais:

- Permitir o escape do ar (que pode passar entre o ajustamento do extrator e as placas, permitindo assim, a ventilação natural desta zona) facilitando o seu enchimento;
- Ao exercer uma pressão, uniformemente distribuída ao longo de toda a base, permite fazer uma extração mais suave, diminuindo assim, o perigo de deformação da peça. Além disso, como a pressão é exercida em toda a base, não deixa marcas de extração.

Quando o sistema de extração é mal concebido, a peça pode deformar excessivamente durante a extração. No caso da Figura 2.49, a moldação tem uma secção tubular que pode oferecer grande resistência à extração. A aplicação de extratores noutras zonas poderia causar a deformação e mesmo a rotura da peça, deixando parte do plástico no molde.

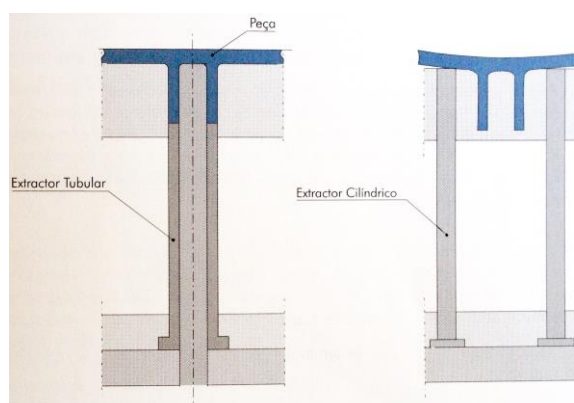


Figura 2.49 – Vantagem da utilização de extratores tubulares, comparativamente a extratores cilíndricos [1].

2.4.9.4 Extratores tipo válvula

Este tipo de extrator (Figura 2.50) permite distribuir a força de extração por uma área maior. É usado, geralmente, para a extração de peças fundas, com pequeno ângulo de saída, moldadas em materiais flexíveis e está, normalmente, associada a um sistema de ar comprimido.

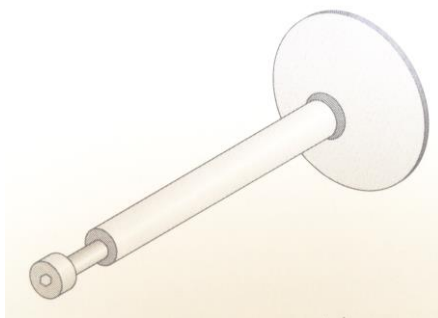


Figura 2.50 – Extrator tipo válvula [1].

2.4.9.5 Extração com placa extratora

A extração com placa extratora é utilizada quando não existe área suficiente para a colocação de extratores ou quando se deseja uma extração com a força uniformemente distribuída. A Figura 2.51 mostra um molde com extração deste tipo. Durante o processo de moldação por injeção, o molde abre segundo o plano de partição A, enquanto que a moldação permanece agarrada na bucha D. Quando o molde abre o suficiente, o avanço das placas B e C promove o avanço da placa E, originando a extração da peça.

A placa extratora deve ser guiada de modo a que se desloque com um movimento contínuo e uniforme. O seu guiamento pode ser assegurado pelas próprias guias do molde, caso estejam fixas do lado onde a placa se movimenta. Esta placa não deve entrar em contato com as superfícies moldantes, pois poderia comprometer a qualidade superficial destas zonas.

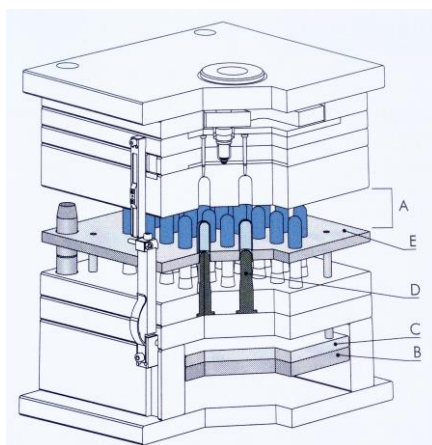


Figura 2.51 – Extração com placa extratora [1].

Neste caso, é obvio que o molde não terá pernos de retorno, sendo o recuo assegurado pela própria placa extratora.

2.4.9.6 Extração com aro extrator

O aro extrator tem um funcionamento semelhante ao da placa extratora, mas geralmente tem dimensões menores. Este componente deve ter um ângulo de saída de cerca de 15° a 20° , de modo a evitar que haja deslizamento contínuo com a placa das buchas, o que poderia conduzir ao seu desgaste. O mesmo aro extrator pode remover várias moldações numa só operação. O aro extrator pode ser ligado às placas dos extratores através de quatro pernos cilíndricos. Neste caso, não é necessário a colocação de botões de encosto, pois o movimento é inibido pelo próprio encosto do aro na placa das buchas.

O recuo do aro extrator é normalmente assegurado pelo próprio fecho do molde. À medida que o molde fecha, empurra o aro extrator para a sua posição inicial. Em moldes de elevada qualidade, esta situação é indesejável, pois pode levar à danificação das superfícies das placas, dependendo do perfil de velocidades durante o fecho.

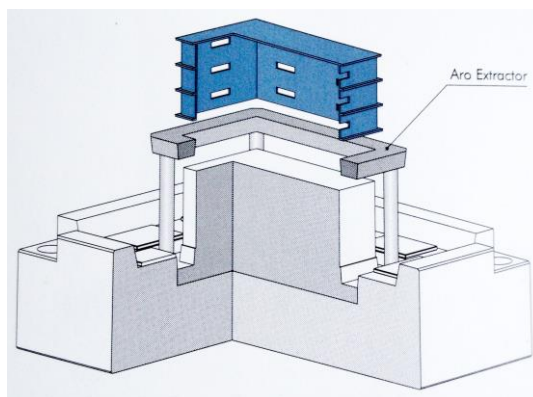


Figura 2.52 –Extração com aro extrator [1].

2.4.9.7 Extração com barras extratoras

As barras extratoras funcionam de maneira semelhante ao aro extrator, mas não atuam em toda a periferia da peça. Estas são usadas nos casos em que a utilização do aro extrator não é economicamente e/ou tecnicamente viável. Podem ser utilizadas em moldes com várias peças com geometria retangular e muito próximas entre si.

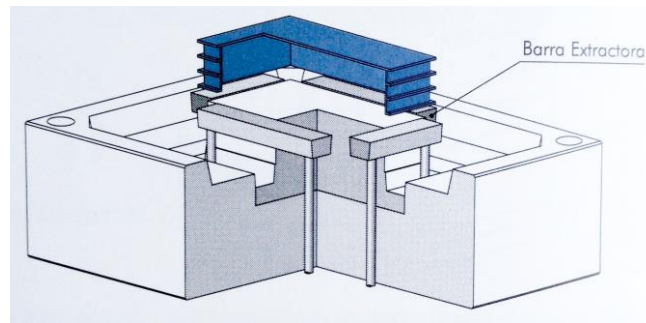


Figura 2.53 – Extração com barra extratora [1].

2.4.9.8 Posicionamento dos extratores

Relativamente ao posicionamento dos extratores nas zonas das peças a moldar indicam-se, na Figura 2.54, algumas boas práticas.

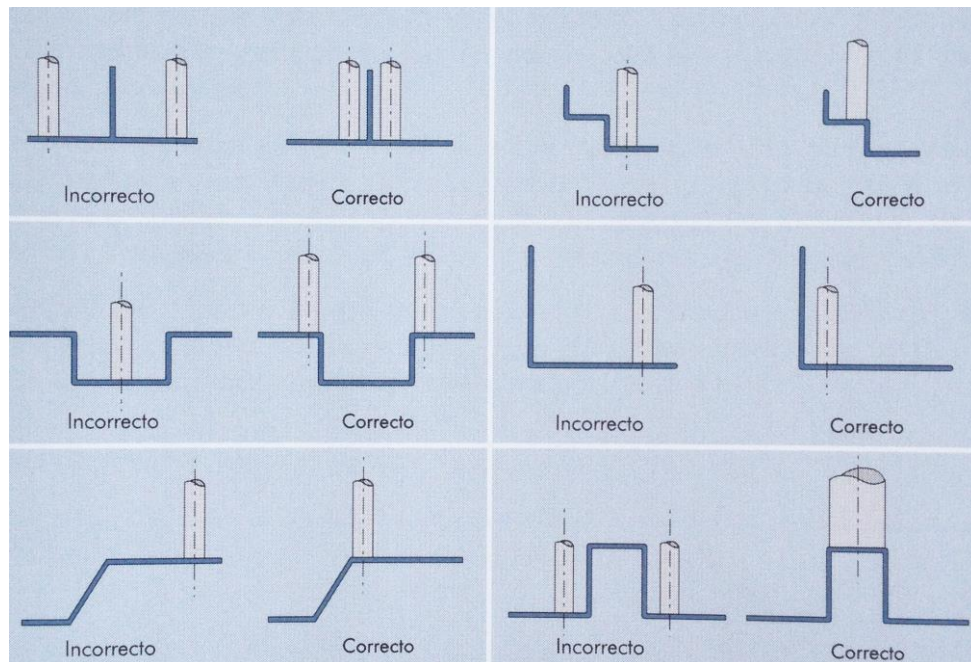


Figura 2.54 – Sugestões para boas práticas de posicionamento de extratores [1].

2.4.10 Contração e empeno da Peça

A variação dimensional das peças injetadas em relação às dimensões do molde depende essencialmente da contração e do empeno.

A contração dos termoplásticos é, sobretudo, o resultado da expansão e contração térmica do material durante as fases de injeção, pressurização e arrefecimento. Assim, os fatores que possam produzir alterações no volume específico afetam também a contração. Estes fatores incluem as características do material, geometria do molde e da peça, e condições de

processamento (por exemplo, segunda pressão, tempo e pressão de injeção, temperatura do molde e do fundido).

Durante a fase de pressurização, a pressão é mantida em valores elevados para permitir fluxo adicional de material para a cavidade. Após solidificação do ataque, termina esta fase, tornando-se fixa a massa total da peça. Nesta altura, as variáveis termodinâmicas (pressão, volume específico e temperatura) podem ser utilizadas para determinar o grau e distribuição da contração volumétrica.

O empeno está associado a uma variação de forma e não implica necessariamente uma variação de volume. Em muitos casos, as duas categorias de variação dimensional podem ocorrer simultaneamente.

Podem ser definidos três valores de contração: contração de moldação (CM), contração de desmoldação (CD), e pós-contração (CP). A contração da moldação é definida pela diferença entre as dimensões do molde frio e as dimensões da peça injetada após 16 horas de condicionamento em ambiente controlado de temperatura e de humidade:

$$C_M = \frac{I_m - I}{I_m} \times 100\%$$

Onde I_m é a dimensão no molde e I a mesma dimensão na peça após condicionamento em ambiente controlado. A contração de desmoldação é a contração exibida pela peça imediatamente após extração e a pós contração é a contração adicional exibida pela peça relativamente à contração de moldação, exibida normalmente em materiais semicristalinos devido ao fenómeno de pós-cristalização.

Na Tabela 2.3 apresentam-se os valores típicos de contração para alguns materiais termoplásticos amorfos e semicristalinos.

Tabela 2.3 – Valores de contração para alguns termoplásticos [1].

Material	PA	PP	LDPE	HDPE	POM	PS	PC	ABS	PMMA	PPO	PBT
Contração (%)	1-1,5	1-2	1,5-3	1,5-3	1,7-2,1	0,4-0,8	0,5-0,7	0,4-0,7	0,3-0,6	0,5-0,8	1,7-2,3

Uma peça moldada por injeção não contrai uniformemente ao longo do caminho de fluxo. A contração mais significativa ocorre ao longo da espessura da peça, devido ao menor constrangimento do molde nesta direção. Na direção de fluxo e na direção transversal ao fluxo o constrangimento mecânico do molde à contração é mais significativo. Acresce a este efeito, o facto de a peça injetada solidificar, dentro do molde, da periferia (casca) para o seu interior (núcleo), o que origina uma obstrução mecânica adicional à contração do núcleo pela casca solidificada nas direções de fluxo e transversal do fluxo.

A Figura 2.55 ilustra a obstrução mecânica causada pela casca solidificada numa peça moldada. As obstruções mecânicas impostas à peça durante o arrefecimento produzem tensões residuais na peça. As tensões residuais podem limitar significativamente o desempenho mecânico de peças injetadas e podem ser particularmente importantes no desempenho das mesmas a temperaturas elevadas, na medida que a ocorrência de relaxação de tensões nestas condições pode conduzir à pós-contração ou empeno significativos e consequentemente ao não cumprimento de tolerâncias dimensionais.

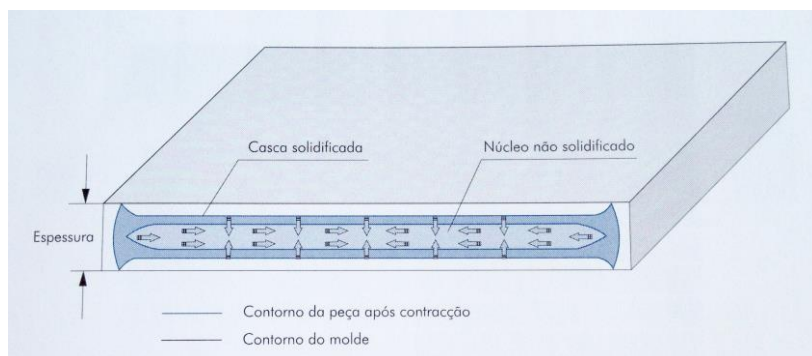


Figura 2.55 – Casca solidificada numa peça moldada [1].

A geometria da peça possui um papel importante na definição das respetivas dimensões finais e consequentemente no cumprimento das tolerâncias estabelecidas. A existência de paredes de reforço, variações de plano ou de outros pormenores geométricos na peça contribui para o constrangimento mecânico da peça dentro do molde. Em alguns casos, os pormenores geométricos podem aumentar substancialmente a rigidez estrutural da peça e condicionar a contração da peça após extração.

A espessura da peça é também um fator importante na definição da contração da peça. Para condições idênticas de temperatura de injeção e molde, duas geometrias de espessura diferentes arrefecem a velocidades diferentes. Quanto maior a espessura da peça, mais demorada é a difusão de calor do núcleo da peça para as paredes do molde e maior é a contração observada. Este facto é mais evidente no caso de materiais semicristalinos, já que velocidades de arrefecimento mais lentas favorecem a cristalização, o que origina percentagens de cristalinidade superiores e consequentemente contrações mais elevadas.

Peças com variações de espessura significativas apresentam variações localizadas do valor de contração, o que pode justificar a ocorrência de empenos. A dependência da contração relativamente à espessura pode tornar o cumprimento de tolerâncias para peças com espessuras elevadas particularmente difícil. Existem algumas regras para o projeto de peças plásticas com vista à redução deste efeito, sendo elas o uso uniforme de espessuras (Figura 2.56) e a transição suave entre espessuras diferentes (Figura 2.57).

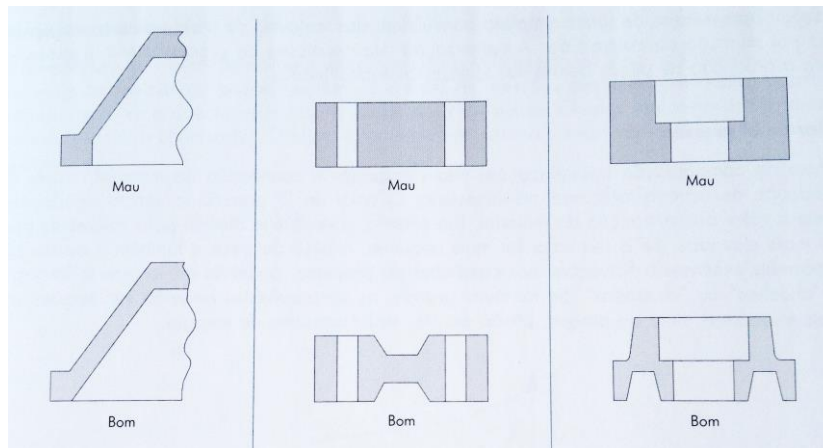


Figura 2.56 – Espessuras uniformes [1].

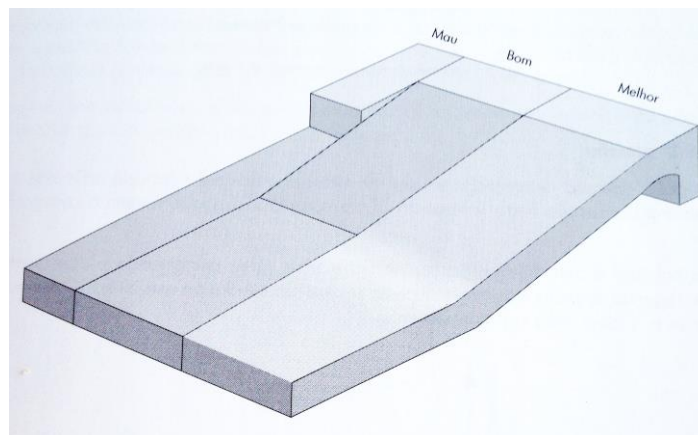


Figura 2.57 – Transição suave de espessuras [1].

2.5 Parâmetros do processo

2.5.1 Refrigeração (Regulação do Caudal)

O estabelecimento do caudal de fluido que circula nos circuitos é normalmente feito através de fluxómetros, frequentemente incorporados na própria máquina. Idealmente, a regulação do caudal e temperatura do fluido deve fazer-se nos termostatos, que asseguram o controlo de ambas as variáveis. Alguns conselhos práticos para o ajuste do caudal passam por:

- Os tubos externos de ligação devem ser de diâmetro igual ou superior ao dos canais de arrefecimento do molde;
- A limitação de um caudal deve ser feita na saída, nunca na entrada. O caudal de entrada deve estar sempre aberto ao máximo de forma a garantir o integral preenchimento dos canais internos do molde. [8]

2.5.2 Temperatura do molde

A temperatura das superfícies moldantes é uma variável crítica do processo, que deve ser criteriosamente controlada por questões de produtividade e de qualidade do produto final. Dependendo do tipo de matéria-prima e das especificações da moldação, deverá ser ajustada uma temperatura de molde (por vezes utilizam-se temperaturas distintas nas duas partes do molde) cujo controlo pode ser assegurado de diferentes modos. A Tabela 2.4 apresenta os dispositivos e meio arrefecedor para variadas gamas de temperatura no molde. [1]

Tabela 2.4 – Dispositivos e meio arrefecedor para determinadas gamas de temperaturas [1].

Gama de temperaturas	Dispositivo	Meio arrefecedor
Inferior a 0 °C	Chiller	Água com anti-congelante
1 a 20 °C	Chiller	Água
20 a 25 °C	Termoregulador	Água
95 a 120 °C	Termoregulador	Água pressurizada
95 a 140 °C	Termoregulador	Óleo
Superior a 140°C	Resistências elétricas	-

A temperatura do molde é um parâmetro fundamental de processamento que determina muitas propriedades da peça moldada, uma vez que condiciona fortemente o desenvolvimento estrutural do polímero durante a fase de arrefecimento.

Normalmente, o tempo de arrefecimento corresponde à maior fatia do tempo de ciclo de moldação, por isso, a sua importância na produtividade do processo é muito elevada. A gama de temperaturas de um molde é muito dependente da natureza do material.

Importa referir que esta variável experimenta uma grande variação ao longo do ciclo de moldação. Acresce que, na maioria dos casos, o operador regula a temperatura do fluido arrefecedor/aquecedor, podendo esta ser bastante distinta da temperatura na superfície moldante, designada por temperatura de interface. A filosofia clássica de ajuste do processo baseia-se em minimizar a amplitude térmica do molde ao longo do tempo de ciclo. No entanto, são crescentes as práticas de arrefecimentos pulsados, baseados em temperaturas de superfícies moldantes relativamente elevadas (para reduzir o choque térmico sobre o material), seguidas de um arrefecimento brusco do molde.

Por vezes, é frequente a utilização de temperaturas diferentes nas duas partes do molde de modo a facilitar a extração ou garantir a estabilidade dimensional das peças. Temperaturas de moldes elevadas aumentam o brilho, a transparência e a contração. Temperaturas baixas aumentam as tensões internas. [1]

2.5.3 Velocidade de injeção

Designa-se por velocidade de injeção, a velocidade de avanço do fuso durante a fase de enchimento da cavidade (expressa em mm/s). Por isso, corresponde ao débito (ou caudal) com que o material é injetado (expresso em cm^3/s).

A velocidade de injeção é determinante no processo. Velocidades de injeção elevadas asseguraram uma baixa viscosidade do fundido, minimizar as perdas de calor durante o enchimento e garantir uma elevada dissipação viscosa durante o escoamento. No entanto, velocidades muito elevadas na frente de fundido podem originar defeitos nas peças.

O controlo eficaz da velocidade de injeção só é possível se o equipamento tiver capacidade para desenvolver a pressão necessária, a fazer fluir o material à velocidade pretendida. Acresce que, devido ao comportamento tixotrópico dos polímeros fundidos, para um conjunto molde/máquina/matéria, a evolução da pressão em função da velocidade de injeção tem uma forma característica como o exemplo da Figura 2.58.

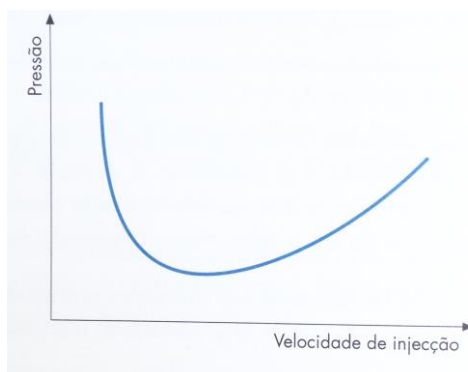


Figura 2.58 – Evolução da pressão em função da velocidade de injeção [1].

A velocidade de injeção a selecionar corresponde ao ponto de pressão mais baixo. Esta condição minimiza o nível de tensões internas na peça, o consumo energético e o desgaste do equipamento. Assim, a velocidade ótima correspondente à pressão mínima de injeção pode ser determinada por via experimental ou com base em modelações do processo.

É frequente terem que se utilizar velocidades de injeção relativamente baixas quando a frente de fundido passa pelo ataque (sob pena de se desenvolverem defeitos, como é o caso do efeito de jato). É igualmente boa prática reduzir a velocidade de injeção no final do enchimento, de modo a reduzir o desgaste do equipamento. Assim, processos criteriosamente ajustados podem requerer a utilização de vários patamares de velocidades de injeção (velocidades escalonadas), como exemplo da Figura 2.59. [1]

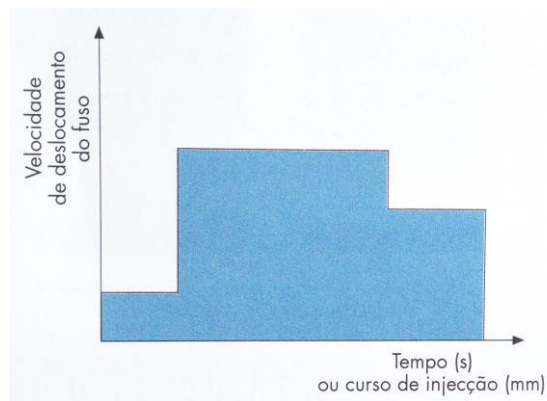


Figura 2.59 – Escalonamento da velocidade de deslocação do fuso [1].

2.5.4 Pressão de injeção

Designa-se por pressão de injeção a pressão máxima que se desenvolve durante a fase de enchimento. Esta pressão é o resultado do esforço necessário para garantir o enchimento de um determinado material, numa impressão com uma geometria específica, e à velocidade ajustada pelo operador.

Assim, importa distinguir entre pressão de ajuste (a pressão de injeção que é regulada pelo operador) e a pressão máxima de injeção (pressão que é efetivamente atingida até à comutação para a fase de pressurização). Se durante o enchimento a pressão de ajuste for atingida, o equipamento deixa de ter capacidade de controlar a velocidade de injeção especificada.

Quando se refere um valor de pressão no processo da injeção, é extremamente importante ter presente o seu significado físico. Nas máquinas hidráulicas o operador ajusta o valor da pressão de óleo. Assim, quando se refere pressão de injeção, está normalmente em causa o valor da pressão no cilindro de injeção responsável pelo movimento axial do fuso. Como a área do pistão deste cilindro é cerca de 10 vezes superior à secção transversal da ponteira do fuso (que exerce a pressão de injeção sobre o fundido), a pressão efetiva sobre o material é cerca de 10 vezes maior que a pressão de injeção de ajuste.

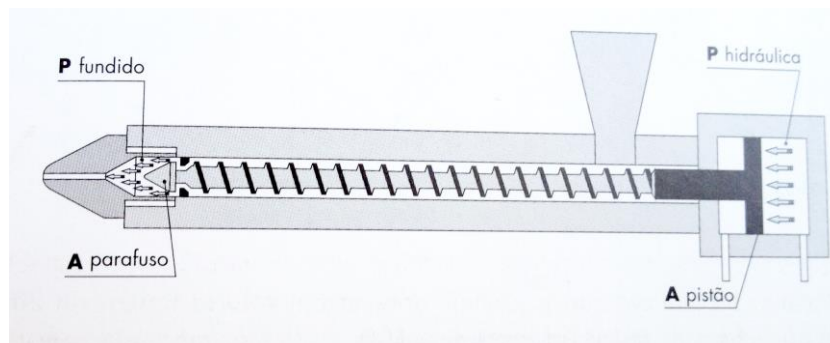


Figura 2.60 – Pressão hidráulica e pressão do fundido [1].

2.5.5 Pressão de manutenção

A pressão de manutenção é também conhecida por segunda pressão ou pós-pressão. Esta variável corresponde à pressão aplicada sobre a moldação após o final do enchimento, com o intuito de compensar a contração volumétrica que o material sofre durante o seu arrefecimento. Através da utilização de sensores de pressão na superfície moldante, é possível medir a evolução da pressão ao longo do tempo numa determinada zona da parede da cavidade.

Após um crescimento moderado durante a parte inicial do enchimento, a pressão aumenta à medida que a cavidade fica completa e o material começa a ser compactado.

A comutação para a fase de pressurização assegura a mudança para um regime de controlo de pressão, em que o fuso passa a exercer um esforço pré-especificado sobre o material. Durante esta fase não há controlo da velocidade a que o material entra na cavidade do molde.

Após algum tempo, e dependendo das condições de arrefecimento, a solidificação do material afeta a transmissão da pressão no interior da moldação, provocando uma diminuição do sinal que é captado pelos sensores de pressão. (Figura 2.61).

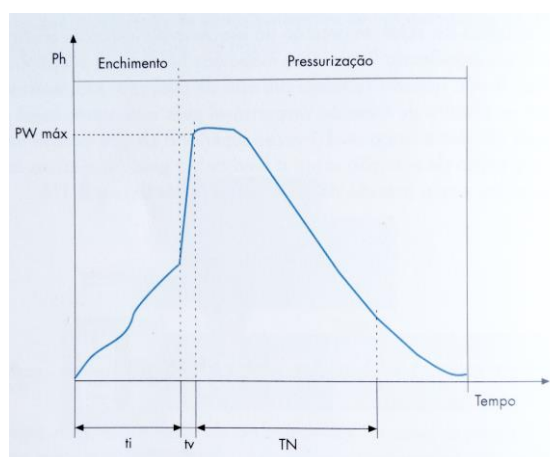


Figura 2.61 – Variação da pressão [1].

O controlo do processo exige uma comutação correta. Comutações tardias podem provocar picos de pressão com consequentes riscos de danificação no molde ou do desenvolvimento de tensões internas elevadas. Comutações precoces causam hesitações no enchimento que podem provocar marcas visíveis.

2.5.6 Tempo de Arrefecimento

O arrefecimento da moldação inicia-se a partir do momento em que o polímero contata as paredes da zona moldante. No entanto, designa-se por tempo de arrefecimento o período após

a fase de pressurização, necessário para permitir a adequada extração da peça. Esta deve ser extraída a uma temperatura tal que garanta a sua estabilidade dimensional e que lhe permita suportar os esforços dos extratores (ou outros dispositivos de extração).

O tempo de arrefecimento pode ser calculado a partir da equação:

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha_{\text{eff}}} \ln(KY)$$

Em que:

t_c - Tempo de arrefecimento (incluindo tempo de manutenção) [s]

s - Espessura da parede [mm]

α_{eff} - Difusividade térmica efetiva média [mm^2/s]

K - Coeficiente dependente da espessura da peça

$4/\pi$ Para peças finas

$8/\pi^2$ Para peças espessas

Y - Temperatura adimensional, dada por: $Y = \frac{T_{\text{fund}} - T_{\text{int}}}{T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}}$

T_{fund} - Temperatura do fundido

T_{int} - Temperatura de interface (aproximadamente a temperatura do molde)

T_{ext} - Temperatura de extração

2.6 Simulação da Injeção – Métodos Numéricos

2.6.1 Branching Flow

De modo a estimar alguns parâmetros do processo de injeção foi criada a primeira ferramenta de cálculo numérico nos anos 70, a qual permitia o cálculo das pressões de injeção considerando algumas propriedades do material, o tempo de enchimento, a espessura e o comprimento de fluxo. Para a determinação do comprimento de fluxo era necessário analisar a geometria e desenhar manualmente contornos de fluxo a partir do ponto de injeção como ilustrado na Figura 2.62. Este processo era bastante moroso e, por isso, foi pouco utilizado. No entanto, atualmente

ainda é útil para ter uma estimativa do tempo de enchimento utilizando uma espessura média da peça e uma aproximação grosseira do comprimento de fluxo.

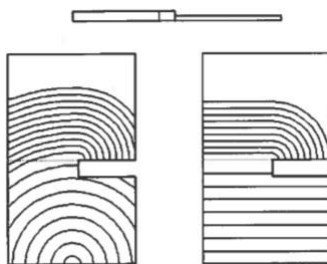


Figura 2.62 – Cálculo do comprimento de fluxo [1].

2.6.2 Simulação 2.5D

Posteriormente, surgiu a simulação de elementos finitos 2.5D, a qual é ainda utilizada para a simulação de peças com paredes finas, que é o caso da grande maioria das peças injetadas. Neste processo é necessário gerar uma superfície média do modelo 3D e uma malha composta por elementos triangulares ou quadrangulares. Posteriormente, a espessura tem de ser atribuída a cada elemento da malha automaticamente ou manualmente. Utilizando este processo não é necessário calcular os comprimentos de fluxo. No entanto, a geração da superfície média pode ser um trabalho árduo, especialmente para geometrias complexas. Além disso, não é o método mais adequado para peças espessas ou com grandes variações de espessura. Nestes casos, a definição da superfície média pode ser um processo com alguma ambiguidade, como ilustrado na Figura 2.63.

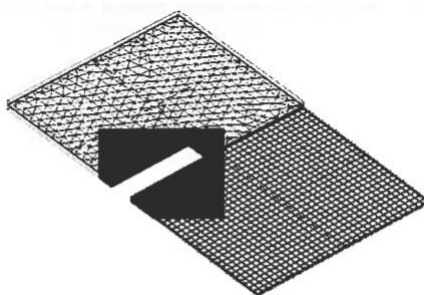


Figura 2.63 – Superfície média 2.5D [1].

Uma das grandes vantagens deste método reside na facilidade de alterar a malha e validar diferentes versões da mesma peça, mais precisamente alterações de espessura e de geometria.

No passado, ocorreram numerosas tentativas para desenvolver aplicações capazes de gerar automaticamente as superfícies médias ou a malha a partir do modelo 3D. Atualmente, isto é possível para peças com geometria simples, mas, à medida que a complexidade aumenta, os

erros da geração da malha também aumentam sendo, por vezes, necessário corrigir a malha manualmente.

2.6.3 Simulação *Dual-Domain*

De modo a resolver estas limitações, foi desenvolvido posteriormente um método para a simulação da injeção utilizando toda a superfície exterior da peça. Este tipo de simulação é conhecido com Dual-Domain ou Fusion. Neste caso, a malha pode ser gerada automaticamente a partir do CAD com pouca intervenção do utilizador. Contudo, apesar da vantagem evidente deste método devido aos ganhos de tempo, torna-se mais difícil conseguir malhas com boa qualidade, especialmente nos casos em que as peças têm muitos boleados, sendo este o caso mais comum das peças injetadas. Outro problema é a estimativa local da espessura da peça e da frente de fluxo, principalmente nas zonas com grande curvatura. Por isso é importante que exista uma boa correspondência entre a malha da superfície exterior e a interior, o que se designa por Surface Mesh Matching. Quanto mais complexa for a geometria, mais difícil é conseguir uma malha com uma boa qualidade e os resultados da simulação irão refletir este aspecto. Na Figura 2.64, está representada uma malha deste tipo, com um baixo nível de correspondência, em algumas zonas, entre a malha das superfícies superiores e inferiores.



Figura 2.64 – Malha superficial triangular “Dual-Domain” [1].

2.6.4 Simulação 3D

Existe a simulação a 3D, que além de permitir uma boa integração com o CAD, permite a simulação de peças com grandes variações de espessura e a visualização tridimensional da frente do fundido. Neste tipo de simulação a malha é composta por elementos sólidos, sendo os elementos tetraédricos, os de topologia mais simples. Mais recentemente, têm sido desenvolvidos métodos para a simulação do processo que utilizam malhas híbridas, ou seja, malhas compostas por diferentes tipos de elementos ou volumes de controlo. Este aspeto permite a melhor adaptação da malha na discretização de domínios complexos mantendo o mesmo número de elementos.



Figura 2.65 – Malha sólida 3D [1].

Apesar de ser a tecnologia mais avançada e promissora, a principal desvantagem reside no maior tempo de cálculo. Normalmente, é necessário um grande número de elementos sólidos para discretizar adequadamente geometrias com alguma complexidade. Além disso, os resultados podem ter maior precisão, caso os parâmetros inerentes ao fluxo forem calculados em mais camadas de elementos ou volumes de controlo ao longo da espessura, o que contribui ainda mais para o aumento do número total de elementos e, conseqüentemente, o aumento do tempo de cálculo. Contudo, com a evolução da velocidade de cálculo dos computadores, esta limitação torna-se cada vez menos relevante. Por isso, é provável que, num futuro próximo, a simulação a 3D possa substituir por completo os outros tipos de simulação.

2.7 Engenharia Simultânea

O desenvolvimento e produção de novos artigos moldados por injeção dependem de dois processos intimamente inter-relacionados: a conceção da peça e o projeto e fabricação do molde.

O lançamento de um novo produto no mercado está muito dependente do projeto e fabricação do molde. Estas fases são complexas, morosas e envolvem investimentos económicos consideráveis. Assim, o sucesso económico das empresas envolvidas pode bem depender do modo como os moldes são produzidos.

Para contribuir para a minimização dos riscos de insucesso desenvolveu-se o conceito de “engenharia simultânea” que se pode definir como um método organizacional que promove o desenvolvimento em paralelo de algumas das atividades de projeto, com o intuito de se reduzir o tempo de execução. A base da sua filosofia é envolver na conceção os setores associados à produção, o mais cedo possível, criando-se assim a ligação entre a conceção do produto, a fabricação do molde, a otimização da matéria-prima e a produção do artigo final.

No entanto, é essencial na fase de projeto garantir o bom desempenho do molde, alongando-se por vezes o tempo de desenvolvimento do produto, de forma a evitar alterações no molde após a sua montagem (Figura 2.66).

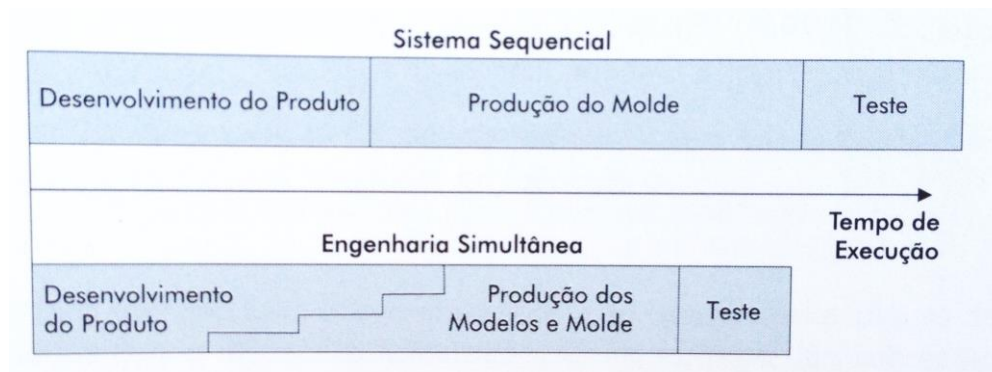


Figura 2.66 – Comparação dos fluxogramas do processo de atividades sequencial e Engenharia Simultânea [1].

O processo de desenvolvimento de atividades em paralelo, em contraste com o sequencial implica a necessidade de maior comunicação entre os diversos setores envolvidos. Os fluxos de informação associados só são viáveis com técnicas assistidas por computador. A informação certa deve estar disponível no local certo, no momento certo e a transferência de informação não deve dificultar o processo nem reduzir o tempo de execução. Estes objetivos conseguem-se com sistemas de transferência de informação transparentes e quando a informação permutada entre os setores que os integram se faça o mais rapidamente possível.

Este modelo ideal, expandido ao limite, tornará intimamente dependentes aspetos funcionais, estruturais e de processamento. Consequentemente, o projeto de produtos termoplásticos tornar-se-á indissociável do desenvolvimento das ferramentas necessárias para a sua produção (moldes e fieiras).

2.8 PEEK

Polyetheretherketone, (Polieterétercetone [1]), mais conhecido no meio industrial por PEEK, é um termoplástico semicristalino, termostático. Possui excelentes propriedades mecânicas e químicas que são mantidas a elevadas temperaturas. As condições de processamento utilizadas para moldar este material podem influenciar a cristalinidade e realçar as propriedades mecânicas.

Devido à sua resistência, PEEK é utilizado para fabricar componentes de várias aplicações, sendo também considerado um biomaterial avançado utilizado em implantes médicos. É um dos poucos plásticos compatíveis com aplicações de vácuo.

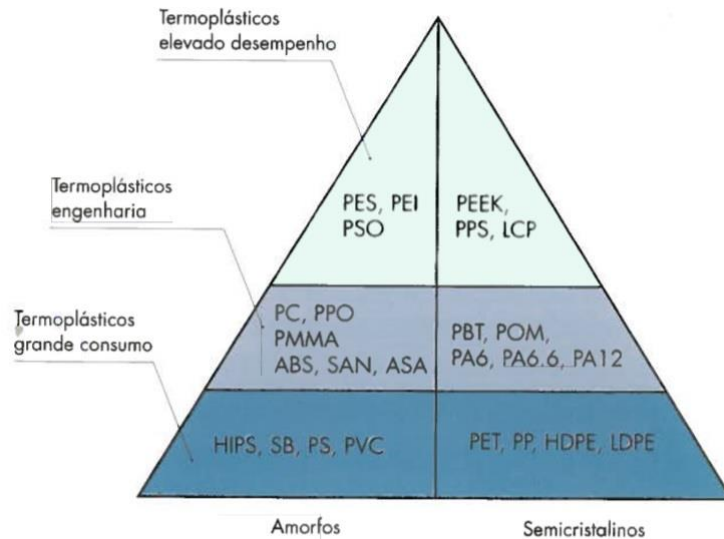


Figura 2.67 – Pirâmide para escolha de materiais a utilizar em função das necessidades [1].

Este material possui boas propriedades mecânicas até -65 °C, aguenta cerca de 5000 horas sem perder as suas propriedades a uma temperatura de 260°C, e aguenta 100 vezes mais à fadiga que os alumínio utilizados nas aeronaves. Relativamente à massa do PEEK, este é 70%, 55% e 40% mais leve que o aço, titânio e o alumínio, respetivamente. [11]

No caso em estudo na dissertação, a referência utilizada é o Victrex Peek ESD101, um material utilizado em casos de indústria na qual o controlo da dissipação de energia electroestática é essencial, constituído por nanotubos de carbono. Na Tabela 2.5 é possível observar algumas das características do Peek ESD101:

Tabela 2.5 – Propriedades do PEEK [12]

	Condições	Valor	Unidade
Tensão de cedência	-55 °C	145	MPa
	23 °C	120	Mpa
	120 °C	80	Mpa
Tensão de Ruptura	-55 °C	200	Mpa
	23 °C	190	Mpa
	120 °C	140	Mpa
Módulo de Young	23 °C	11,5	GPa
Ponto de Fusão	-	343	°C
Viscosidade	400 °C	275	Pa.s
Densidade	-	1,65	g/cm ³
Calor Específico	-	1,009	J/g.K
Difusividade térmica	No solo	0,220	mm ² /s
	Em voo	0,399	mm ² /s
Condutividade térmica	No solo	0,366	W/(m.K)
	Em voo	0,664	W/(m.K)

Para se elaborar um molde, são necessárias algumas características adicionais acerca do material, que ajudam a determinar condições de funcionamento e aspetos de projeto (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Características do PEEK para moldação. [12]

	Valores	Unidade
Contração	0,4-0,5	%
Temperatura de estufagem	150 (3h) ou 120 (5h)	°C
Temperatura da superfície do molde	180-220	°C
Ataque	>2	mm
Canal de alimentação	>3	mm
Temperatura da tremonha	<100	°C
Temperaturas recomendadas para o bico de injeção	365/370/375/380/385	°C
Escoamento em espiral	140	Mm

Existem poucos dados acerca de moldação para esta referência de PEEK. Assim, estes dados são meramente indicativos, sendo que a empresa UEpro, pela experiência adquirida com os já mais de 150 moldes utilizando este material, já adaptou algumas variações a estes parâmetros que considera mais adequados aos bons resultados (Tabela 2.7)

Tabela 2.7 – Parâmetros adaptados pela UEpro.

	Valor	Unidade
Contração	0,8	%
Temperatura da superfície do molde	200-210	°C
Temperatura de estufagem	150 (5h)	°C

Relativamente à profundidade das fugas de gases para o PEEK ESD 101, não há qualquer tipo de valores aconselhados oficialmente, pois não existem amostras nem estudos suficientes para o efeito. No entanto, com a experiência prática, pode-se afirmar que as fugas de gases devem variar a sua profundidade entre 0,02mm e 0,03mm. Dado que o material atinge temperaturas superiores a 350 °C no molde, este queima muito e faz com que o ar dentro da cavidade queime também se as fugas de gases não forem abundantes e, para a exigência das peças em estudo nesta Dissertação, é necessário por vezes utilizar profundidades de até 0,055mm em zonas onde queima muito, apesar de originar rebarbas

3 Proposta de Resolução de Problema

Sendo o objetivo principal desta dissertação o sucesso da concepção do molde, que consiste idealmente na aprovação do mesmo após o primeiro teste, a dissertação incide no estudo de todo o projeto de um molde, desde a encomenda do molde até à aprovação do mesmo, com o intuito de desenvolver novas metodologias de projeto e fabrico do molde para injeção de peças em PEEK que servirão para substituir alguns componentes metálicos das asas das aeronaves.

As metodologias utilizadas na concepção dos moldes de injeção podem ser otimizadas, no entanto o que poderá fazer maior diferença a nível de qualidade, custos e tempo de entrega será a sistematização dessas metodologias.

A UEpro tem produzido moldes de injeção num compósito polimérico de origem recente (PEEK ESD 101) que tem um custo aproximado de 200€ por quilograma. Daí provém a necessidade de garantir que os moldes tenham um número de testes até à aprovação o mais reduzido possível. Para tal é necessário otimizar o projeto para garantir a qualidade das peças dispendendo o mínimo de matéria prima possível. É de acrescentar também as condições de moldação utilizadas para estes moldes, dado que é refrigerado a óleo a 220°C, necessita da utilização de placas isolantes em toda a volta do mesmo e da utilização de controlos de temperatura específicos, dado que os mais utilizados não atingem esta gama de temperaturas.

Assim, embora num contexto geral, a dissertação irá incidir sobre este tipo de moldes, de modo a poder contribuir para o sucesso deste projeto da empresa. Todo o projeto do molde será analisado nesta dissertação de modo a detetar eventuais falhas e sugerir melhorias. Far-se-á um estudo de simulação em simultâneo com o projeto e fabrico do molde, utilizando o Moldex3D, de modo a demonstrar como esta ferramenta pode contribuir para a sistematização e melhoria de todo o projeto.

“This PEEK material had never before been used by the aerospace industry in its injection moulding grade but Denroy’s knowledge of metal replacement gained in the automotive sector proved invaluable in design of aerospace componentes. The new brackets now offer excelente stiffness and high wear resistance, and will be used as fixing/location points for fuel pipes, hydraulic pipes and various cables. As many of the brackets will be constantly immersed in fuel and are intended to be good for the life of the aircraft, material selection was a major consideration.” [13]

3.1 Aeronáutica

A indústria aeronáutica é uma área de grande interesse no mundo da engenharia, considerada uma indústria de elevada relevância, essencialmente pelo fator de risco associado ao transporte de seres humanos. Numa época em que a preservação do planeta é uma medida de grande importância a nível mundial, esta indústria aposta fortemente no seu desenvolvimento respeitando estas medidas ecológicas, procurando desenvolver tecnologias inovadoras que reduzam o consumo, que facilitem a montagem dos componentes e de necessidade reduzida de manutenção.

Alguns fatores, direta ou indiretamente relacionados com este desenvolvimento são:

- Os custos relacionados com o consumo de combustível representam cerca de 35% dos custos totais de uma companhia aérea; [11]

- De modo a satisfazer as necessidades relacionadas com o transporte aéreo, de acordo com os analistas, terão que ser produzidos 35000 aviões novos nos próximos 20 anos; [11]

- Uma redução de 45 kg em 500 aeronaves resulta numa poupança de até 5 000 000 de dólares em custos anuais de combustível e na redução de cerca de 17 000 toneladas de dióxido de carbono por ano. [11]

As peças plásticas presentes nos aviões, em pequena quantidade, são usualmente produzidas por moldes de compressão. No caso dos componentes das asas, havendo um enorme número de *brackets* iguais presentes, leva à necessidade de produção de grandes lotes em série, o que incentiva à produção através de moldes de injeção, dado o seu reduzido tempo de ciclo.

4 Metodologias

4.1 Análise de moldes anteriores ao estudo

Dada a complexidade do projeto de um molde que combina diversos ramos da Engenharia Mecânica, torna-se necessário criar uma base de conhecimentos específicos desta indústria para que seja possível realizar um estudo de projeto em torno da mesma. Com o intuito de haver algum conhecimento prático acerca deste tipo de moldes previamente ao início do estudo, fez-se uma análise aprofundada dos moldes produzidos pela empresa durante o ano de 2014.

A empresa necessitava de fazer uma análise dos fornecedores, pois dado o excesso de trabalho sentido nesse ano, foi necessário recorrer a novos fabricantes de moldes, tendo uns mais sucesso que outros. No entanto, dado o contínuo fluxo de trabalho, torna-se complicado disponibilizar tempo para isso, pelo que esta análise estatística, além do contributo pessoal e aprendizagem, foi de enorme relevância e muito útil para a empresa.

Foi necessário consultar todos os processos de desenvolvimento dos moldes para PEEK (131 moldes) e analisar cuidadosamente os relatórios produzidos após cada teste do mesmo. Foram seleccionados 7 critérios para analisar. Os moldes foram analisados por fabricante (embora isso não possua contributo para a aprendizagem, é o principal interesse da empresa), e após serem todos verificados, foi feito um resumo da análise. Na Figura 4.1 apresenta-se o esquema para a análise de um molde, onde se pode ver quais os critérios avaliados.

Molde Nº 1569 (M4010)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Export
1 - Rebarba Extractores											05/09/2014
2 - Dimensões Pernos		X									
3 - Fugas Gases	X	X									
4 - Desacertos Juntas											
5 - Acertar extractores c/Bucha	X										
6 - Rebarbas	X	X									
7 - Gravações não de acordo											
Obs.											

Figura 4.1 – Quadro utilizado para a avaliação de um molde.

De seguida foi feito um resumo com as conclusões obtidas acerca das qualidades demonstradas por cada fabricante, e também uma conclusão geral, como pode ser consultado no Anexo A2. Estas conclusões serão utilizadas também para descobrir como é que cada fabricante evita certas falhas, de modo a que se possa contribuir para a melhoria de outros. Na Tabela 4.1 é apresentado um excerto do Anexo B, que representa apenas os totais registados (embora para a empresa tenha relevância, no contexto da dissertação não tem interesse a distribuição dos resultados por fabricante).

Tabela 4.1 – Resumo da análise feita, apresentando valores totais.

		Total	Total (%)
Nº de Moldes		131	100%
Moldes aprovados ao:			
	1º Teste	6	4,6%
	2º Teste	46	35,1%
	3º Teste	31	23,7%
	4º Teste	24	18,3%
	5º Teste	11	8,4%
	6º Teste	8	6,1%
	7º Teste	2	1,5%
	8º Teste	2	1,5%
	9º Teste	1	0,8%
	10º Teste		0
Nº médio de testes		3,27	
1º Teste			
	1 - Rebarba Extractores	36	27,5%
	2 - Dimensões Pernos	50	38,2%
	3 - Fugas Gases	98	74,8%
	4 - Desacertos Juntas	66	50,4%
	5 - Acertar extractores c/Bucha	71	54,2%
	6 - Rebarbas	85	64,9%
	7 - Gravações não de acordo	31	23,7%

Relativamente ao enriquecimento pessoal, esta análise permitiu ter uma percepção dos aspetos a ter em conta no projeto, onde é mais crítico e se deve ter mais atenção no fabrico deste tipo de moldes de injeção.

4.2 Peça para o estudo

Para o estudo desta dissertação, utilizou-se um molde desde o início da sua encomenda, após aprovação do orçamento realizado. Este molde obteve o nº 1724, sendo utilizado como referência para tratar do mesmo, a nomenclatura “M1724”, como irá ser denominado daqui em diante.

Pretende-se que este molde produza duas peças simétricas (esquerda e direita). Para o efeito, apenas se irá estudar uma peça, dado que todos os aspetos/parâmetros exigidos serão idênticos para ambas as peças. A peça tem a referência THP Brackets G02810036-001 e é constituída pelo material PEEK ESD 101.

Estas peças fazem parte de um conjunto de brackets estruturais em PEEK que irão substituir as atuais em alumínio existentes nos aviões da Bombardier. Assim, as suas exigências de qualidade, resistência e toleranciamento são de acordo com as exigências da indústria aeronáutica. Neste caso, as maiores exigências estão no diâmetro e localização dos furos. O diâmetro não pode exceder uma tolerância de 0,076mm, e a distância entre furos não pode exceder uma tolerância de 0,254mm.

Na Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam-se as peças pretendidas pelo cliente, denominado por Artigo ou Desenho de Artigo:

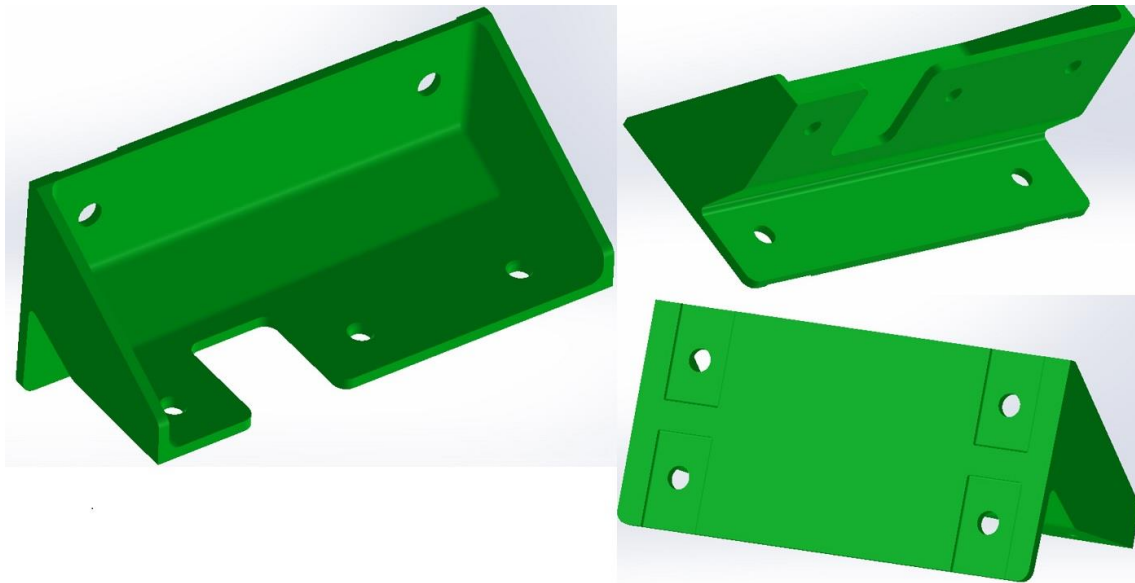


Figura 4.2 – Peça utilizada para o estudo do molde (THP Brackets G02810036-001).

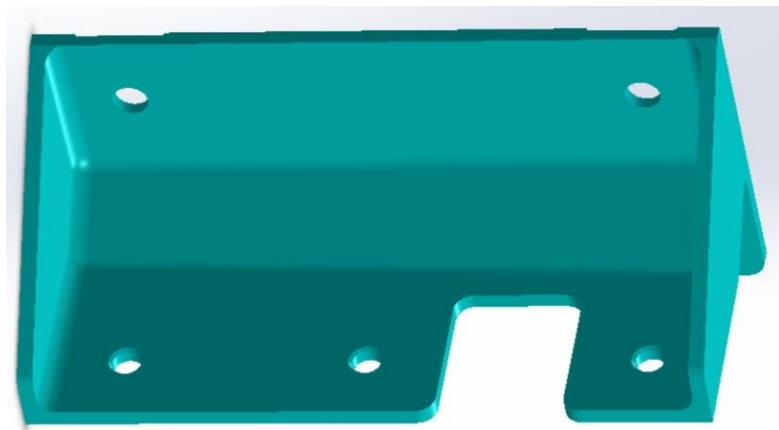


Figura 4.3 – Peça simétrica à utilizada no estudo, injetada também no mesmo molde (THP Brackets G02810036-002).

4.3 Especificações do molde

Para se iniciar o projeto do molde, o cliente envia e/ou sugere algumas especificações técnicas que considera adequadas ou que são estritamente necessárias, e outras são definidas pela UEpro antes de se iniciar o projeto do molde.

Conforme referido em 4.2, o molde irá produzir duas peças diferentes, ou seja, na linguagem utilizada nesta indústria, diz-se que se trata de um molde de 1+1 cavidades. Estas peças não são para ser produzidas simultaneamente numa injeção. Será produzida apenas uma de cada vez, pelo que será necessário colocar um postigo intermutável na injeção que permita uma fácil alteração do lado para o qual injeta. O molde tem que garantir um mínimo de 500 000 injeções. O canal de injeção terá que ser frio e trapezoidal, sendo o ataque em leque, como foram feitos todos os moldes deste tipo até à data.

Para manter o molde a uma temperatura constante de aproximadamente 205°C, além dos canais de refrigeração com óleo a 220°C maquinados diretamente na cavidade e bucha devem ser colocadas 2 a 4 resistências de cada lado, nas chapas estruturais posteriores à cavidade e bucha, respetivamente. Estas devem possuir termopar, para funcionar a uma temperatura de 215°C.

O molde tem que ser projetado com o objetivo de ser utilizado numa máquina de injeção Ferromatik 110. Isto significa que há dimensões mínimas e máximas que devem ser respeitadas para o molde funcionar nesta máquina. A Figura 4.4 representa um excerto do documento onde se podem ver as características da máquina que se devem ter em consideração.

5. Máq. Injecção prevista:

Marca: Ferromatik	Força de fecho: 110 Ton.
Ø anel centragem injeção 101,6	Ø anel centragem extracção (mm)
Dimensões dos pratos da máquina 690x690	(mm)
Distância entre colunas 470x470	(mm)
Espessura de molde - mínimo 250 (mm)	Máximo (mm)
Curso de abertura (mm)	Curso de extracção 150 (mm)
Bico: <input checked="" type="checkbox"/> Raio 12,7 (mm)	<input type="checkbox"/> Cone <input type="checkbox"/> Plano
Penetração máxima do bico da máquina 170 (mm)	

Figura 4.4 – Especificações para a máquina de injeção prevista.

São inicialmente definidos também os tipos de aço a utilizar, conforme demonstrado na Tabela 4.2, de acordo com a norma W .Nr..

Tabela 4.2 – Aço a utilizar nos componentes do molde e respetivos tratamentos térmicos.

Designação	Material	Tratamento Térmico
Estrutura	1.1730	
Chapas à junta	1.2311	PT 30/33 HRc
Chapas extratoras	1.2311	PT 30/33 HRc
Cavidades	1.2344	Temp. 48/52 HRc
Buchas	1.2344	Temp. 48/52 HRc
Elementos móveis	1.2344	Temp. 48/52 HRc
Barras de deslize	1.2842	Temp. 58/60 HRc
Granzépios	1.2842	Temp. 58/60 HRc
Barras de encosto	1.2842	Temp. 58/60 HRc

Nestes moldes, devido às temperaturas, é também definido previamente que devem ser utilizadas chapas isolantes de espessura de 6mm em toda a envolvente do molde.

Os acabamentos superfícies devem ser tidos também em consideração, essencialmente na cavidade, bucha e outros elementos moldantes (por exemplo, os elementos móveis). Estes devem ter um acabamento superficial com lixa 400.

Relativamente a prazos, são estabelecidas 3 datas, como apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Prazos para as etapas principais do molde.

	Data
Desenho Preliminar	16/02/2015
Desenho Final	09/03/2015
Fabrico do molde (1º teste)	24/04/2015

4.4 Projeto do Molde

Sendo o projeto do molde o principal foco desta dissertação, como técnico da UEpro, participou no projeto e simultânea modelação do M1724 (Desenho Preliminar). Durante o mesmo, foi possível colocar algumas questões pertinentes sobre certos aspetos a ter em conta, e também colaborar em algumas tomadas de decisão por parte do projetista. Aquando da realização do projeto e modelação do molde, elaborou-se uma metodologia/guia acerca de quais os passos a tomar para a elaboração de um molde de injeção para componentes aeronáuticos em PEEK, que não se afasta muito de um molde de injeção para outros componentes, salvo certas particularidades.

Antes de se iniciar a modelação do molde, é necessário ter já uma idealizada uma conceção da mecânica do molde, ou seja, como irá ser desmoldada a peça é como é feita a abertura do molde (elementos móveis, balances, etc). Alguns pormenores da mecânica poderão ter que ser alterados no momento da modelação, dados alguns detalhes mais técnicos que se observam no 3D, nomeadamente para facilitar o processo de maquinação, evitar grandes castelos, "facas", e *sharp edges*, assim como facilitar o ajustamento final do molde e o acerto de juntas.

Seguidamente, apresentam-se as etapas seguidas para a elaboração do projeto/desenho/modelação do molde M1724 como forma de tópicos, para facilitar a sua compreensão e ordem, e para que também possa ser vista como instruções para projetar moldes deste tipo. Dado que estes passos podem ser tidos em consideração para outros projetos, será apresentado como se o molde fosse de apenas uma peça, de modo a facilitar a assimilação. A terminologia utilizada será a utilizada na indústria de moldes de injeção na Marinha Grande, no anexo E encontra-se um glossário com a correspondência de alguns termos utilizados que não são considerados os mais corretos.

- Usualmente o desenho de artigo, nesta fase, deverá já ter as saídas de desmoldação criadas, com os ângulos de acordo com o material e geometria embora, por vezes, nesta fase ainda seja necessário fazer algumas alterações neste sentido;
- É então inserida a contração na peça – consiste em, de acordo com o índice de contração do material, alterar a escala da peça, para que tome as dimensões que terá que ter no aço, para que após a contração tenha as dimensões pretendidas;
- A partir da peça já com a contração, criam-se blocos aos quais será aplicada a função “cavidade” que irá criar o negativo da peça nesses blocos. Neste caso, são criados o elemento móvel lateral, a bucha e a cavidade;
- Nestes blocos começam a ser marcadas as zonas moldantes e as zonas de ajustamento;
- São criados ângulos para os movimentos e encaixe destes elementos, de acordo com o espaço necessário e disponível;
- Configura-se o movimento do elemento móvel, criando as barras de deslize, granzépios, etc. Nesta fase podem também ser criados, se necessário, outros mecanismos de movimento como balancés ou unidades de desenroscamento;
- De acordo com as especificações, criam-se:
 - O anel de centragem;
 - Os postigos da injeção e da extração – para facilitar a limpeza em caso de entupimento e evitar danos provenientes disso;
 - Os canais de injeção;
- Adiciona-se pernos na bucha para os furos da peça – têm que ser posicionados porque o eixo dos furos não é normal à superfície da peça;
- Adiciona-se pernos na cavidade para os furos da peça – têm que ser posicionados porque o eixo dos furos não é normal à superfície da peça;
- Faz-se o ajuste das cotas nominais dos componentes até então modelados – de modo a obter cotas nominais com valores mais exatos e preferencialmente inteiros;
- Cria-se a chapa 2;
- Colocam-se as guias do movimento do elemento móvel – basta recorrer a um catálogo virtual inserido dentro do software de modelação, que possui os mecanismos/acessórios necessários no molde, não havendo assim a necessidade de os criar, bastando apenas dimensionar;

- Faz-se a chapa 3 (não há chapa 4, porque a 3 faz o efeito da 4, e a bucha "interior" faz de chapa 3)
- Escolhem-se os calços de catálogo (chapas 5 e 6) – é necessário ter em conta o curso de extração necessário, pois este influencia a espessura dos calços;
- Fazem-se as chapas 7,8 e 9, que correspondem, respetivamente, às chapas de extração e à ultima chapa estrutural onde se apoiam os calços e as chapas de extração;
- Faz-se a chapa 1 que corresponde à chapa que está do lado da injeção da máquina;
- Colocam-se as guias do molde (neste caso é *standard* da estrutura);
- Define-se o topo do molde – é necessário ter em atenção a queda das peças, e também a localização prevista para as entradas do fluido de refrigeração;
- Faz-se o rasgo no canto da guia deslocada (guia com diâmetro diferente) – este rasgo permite que na fabricação não se montem as chapas erradamente, de modo a que se encaixe tudo na orientação correta;
- Fazem-se os rasgos nas chapas 1 e 9 para os parafusos da máquina do cliente, de acordo com as especificações – estes parafusos servem para fixar o molde ao prato da máquina;
- Chanfram-se todas as quinas vivas exteriores das chapas do molde;
- Cria-se/colocam-se chapas isolantes em torno de todo o molde;
- Cria-se o travamento entre a bucha e a cavidade – tem como objetivo evitar eventuais deslizamentos entre as superfícies de contato destes dois elementos;
- Colocam-se as guias e os casquilhos da extração, e também a haste do KO;
- Colocam-se as resistências para aquecimento do molde – 4 do lado da bucha e 4 do lado da cavidade;
- Fazem-se caixas para passar os fios das resistências e adicionam-se uns pernos roscados para fazer de batente;
- Colocam-se *slide retainers* para os elementos móveis;
- Segue-se a etapa mais morosa que envolve uma elevada experiência, que consiste na criação dos canais de refrigeração e dos extratores:
 - Fazem-se os furos dos canais de refrigeração do lado da cavidade, colocam-se tampões e tacos e fazem-se furos nas chapas envolventes para passar os records;
 - Fazem-se os canais de refrigeração e colocam-se os extratores do lado da bucha – é necessário ter em consideração que junto às superfícies moldantes, o espaço disponível tem que ser partilhado entre os canais de refrigeração e os extratores. Assim, a criação destes dois componentes deve ser trabalhada simultaneamente, por tentativa erro de modo a obter o melhor compromisso entre ambos.
 - Faz-se a refrigeração dos elementos móveis – neste caso, optou-se por utilizar a técnica de refrigeração em palheta devido ao reduzido espaço existente;
 - Faz-se a refrigeração das chapas 2 e 3;

- Coloca-se o extrator do jito – como se trata de injeção fria, existem canais de alimentação que solidificam e que necessitam de ser ejetados juntamente com a peça, a sua separação só ocorre já fora da máquina, dado que o ataque é em leque. Deve-se recuar o extrator do jito 3mm para que o mesmo tenha mais guiamento (mais plástico diminui a possibilidade de “fugir” ao extrator);
- Adicionam-se canais para as fugas de gases onde for possível, nos contornos das peças. Os rasgos das fugas são feitos em maior área possível (nesta fase não se consultou a simulação);
- Colocam-se os últimos acessórios, tais como parafusos, roscas para olhais, legendas IN/OUT para a refrigeração, gravações nas chapas, barra de transporte, etc;
- Fazem-se pequenos ajustes dimensionais e uma verificação geral do projeto.

Após o fim da modelação do molde, são criados desenhos 2D com cortes e vistas necessárias e suficientes à boa compreensão e análise do projeto por parte do cliente. É enviado o desenho para o cliente com vistas 2D (Anexos C e D), e envio da modelação 3D (Figura 4.5).

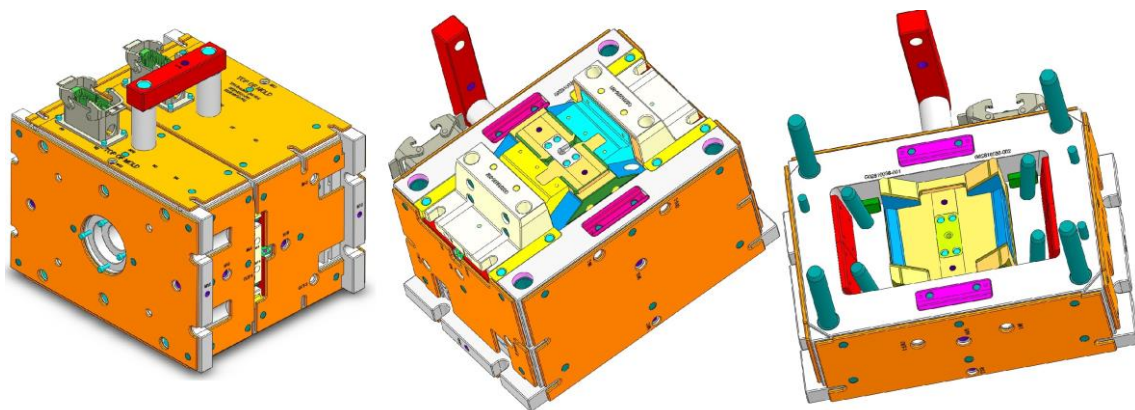


Figura 4.5 – Modelação 3D do molde M1724.

Dado que estamos numa era em que é aplicada a técnica de Engenharia Simultânea, e sendo este um Desenho Preliminar, o projeto sofre alterações nas 2/3 semanas seguintes, no início da produção e de acordo com pequenos ajustes do cliente ou outros que se considerem necessários, até à obtenção do chamado Desenho Final.

4.4.1 Mecânica do molde

Dada a geometria da peça a moldar, é necessária a utilização de movimentos laterais de modo a que possam ser feitos os furos laterais (1) e moldados os pormenores de encaixe (2), conforme ilustrado na Figura 4.6.

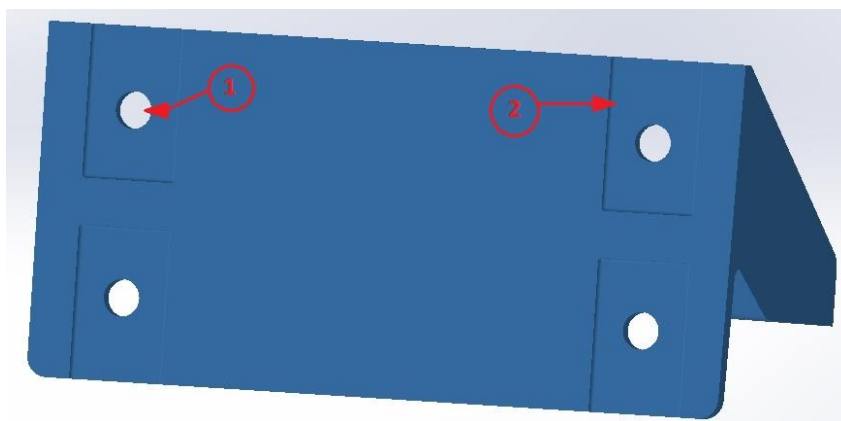


Figura 4.6 – Ilustração representativa dos furos e pormenores de encaixe que originam a necessidade da utilização de elementos móveis.

Para o efeito, e como são moldadas duas peças simétricas, utilizaram-se dois elementos móveis, sendo que cada um é responsável por uma peça (Figura 4.7).

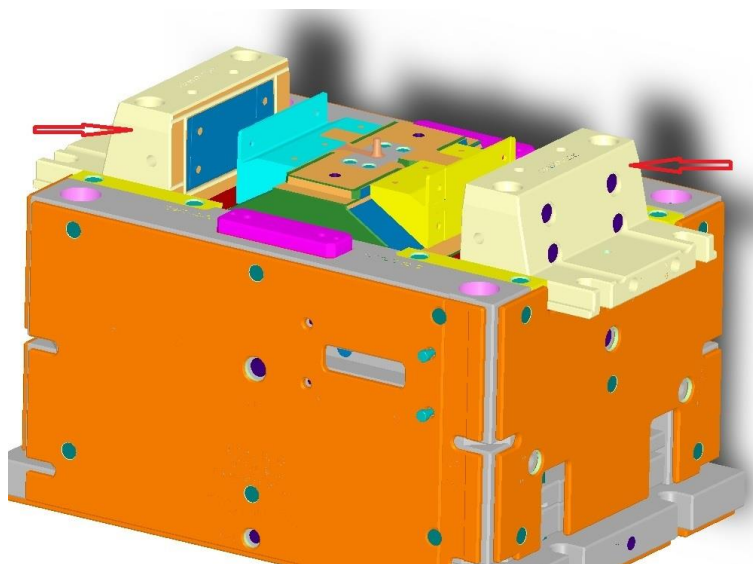


Figura 4.7 – Elementos móveis.

4.4.2 Injeção da peça

O tipo de injeção da peça não foi opção a considerar, pois era já uma especificação exigida por parte do cliente final, sendo o ataque em leque e os canais trapezoidais (Figura 4.8). No entanto, a razão para a sua escolha por parte do cliente deve-se ao facto de se pretender que o material faça um preenchimento uniforme da cavidade, por a peça possuir uma superfície constante e de espessura fina (aproximadamente 2,5mm) e também pela minimização do efeito de empeno devido à orientação molecular causada pelo enchimento.

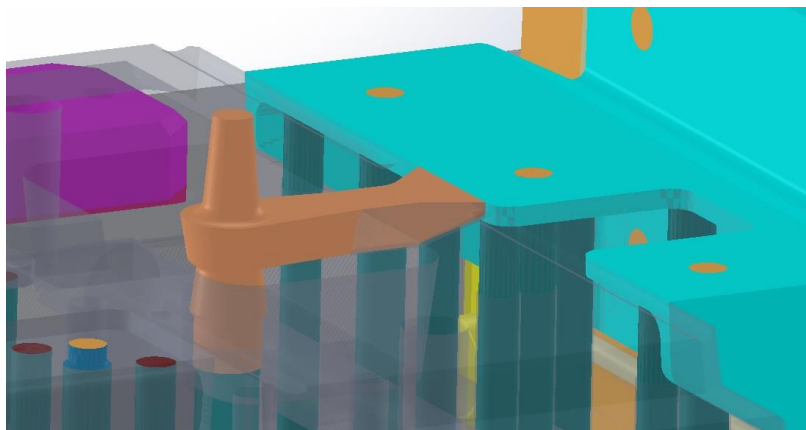


Figura 4.8 – Canal de injeção e ataque à peça, em leque.

Fez-se uma pequena alteração face ao esperado, fazendo com que o leque seja mais aberto para o lado que possui uma cavidade a preencher maior, de modo a que haja uma melhor distribuição do fluxo de material e um enchimento mais homogêneo da cavidade do molde (Figura 4.9).

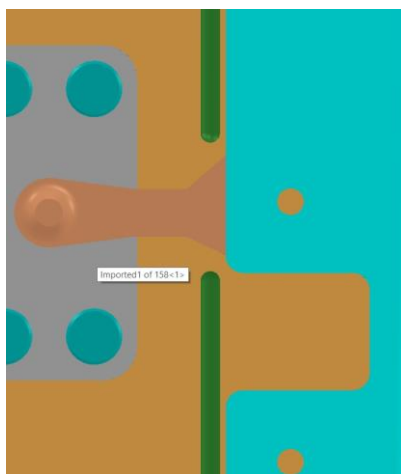


Figura 4.9 – Pormenor da abertura do ataque em leque.

4.4.3 Sistema de Extração

O sistema de extração deve ser suficiente para permitir a extração da peça, com a condição de não se encontrar com os canais de refrigeração. A Figura 4.10 ilustra a localização dos extratores (círculos a vermelho) na bucha.

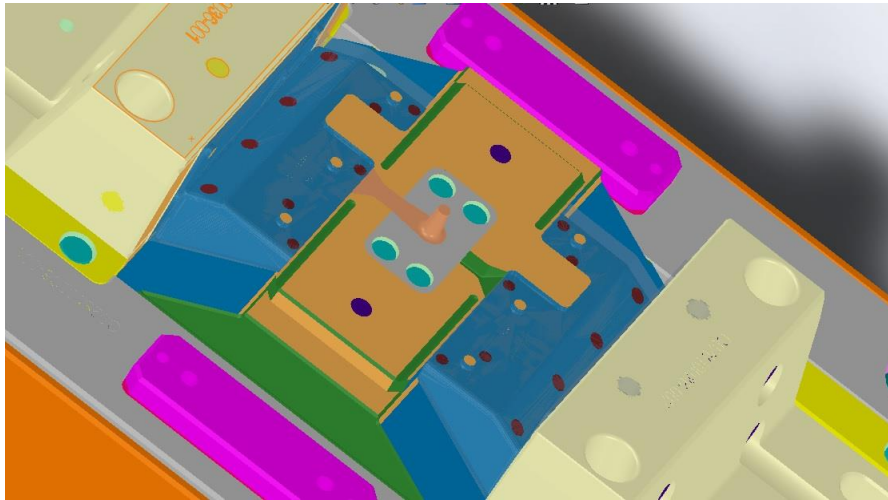


Figura 4.10 – Localização dos extratores.

Os 4 extratores em linha do lado esquerdo da 1ª peça e do lado direito da 2ª peça, respectivamente, estão localizados em superfícies inclinadas (não normais ao eixo do movimento de fecho e abertura do molde), pelo que esses devem ser posicionados, para que não haja rotação dos mesmos (Figura 4.11). Os restantes são extratores cilíndricos simples.

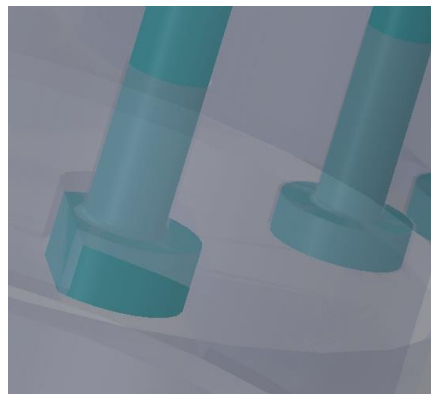


Figura 4.11 – Extrator posicionado (à esquerda) e extrator cilíndrico normal (à direita).

4.4.4 Sistema de Refrigeração

A refrigeração das peças deve permitir um rápido arrefecimento da peça injetada para que possa ser ejetada, de modo a diminuir o tempo de ciclo, mas também deve permitir que o molde se mantenha a uma temperatura constante de aproximadamente 200°C, para que haja um bom fluxo de material. Aproveitando os espaços em que não estão localizados os extratores, tentando ao mesmo tempo abranger o máximo possível das superfícies moldantes.

Criaram-se então o circuito de refrigeração da cavidade (Figura 4.12), o circuito de refrigeração da bucha (Figura 4.13), e os circuitos dos elementos móveis (Figura 4.14). Colocam-se também 4 resistências na cavidade e 4 na bucha (Figura 4.15, a azul), para ajudar a manter o molde a

temperatura constante e para que o seu tempo de aquecimento para iniciar a produção seja reduzido (entre 15 e 30 minutos).

No circuito dos elementos móveis, devido ao reduzido espaço disponível, mas também à elevada área da superfície moldante em contato com os mesmos, é utilizada a técnica de refrigeração em palheta (Anexo A).

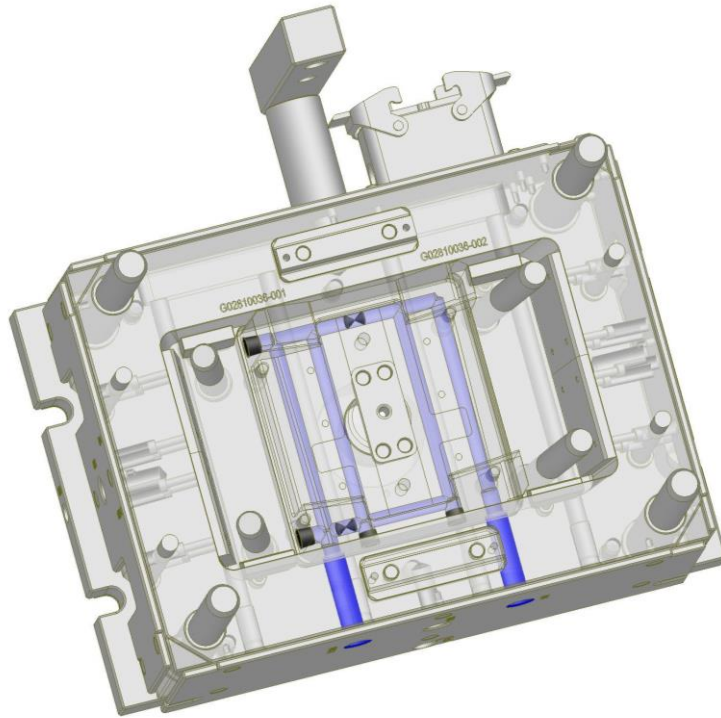


Figura 4.12 – Circuito de refrigeração da cavidade.

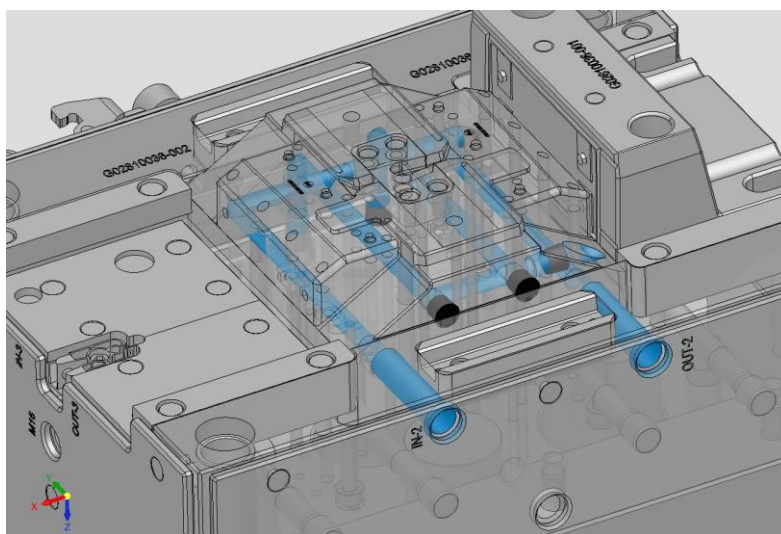


Figura 4.13 – Circuito de refrigeração da bucha.

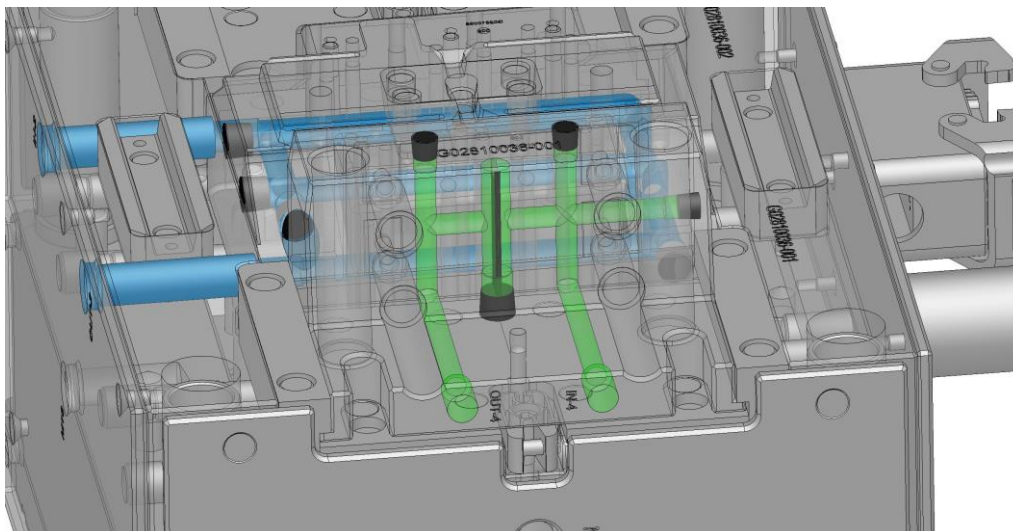


Figura 4.14 - Circuito de refrigeração do elemento móvel.

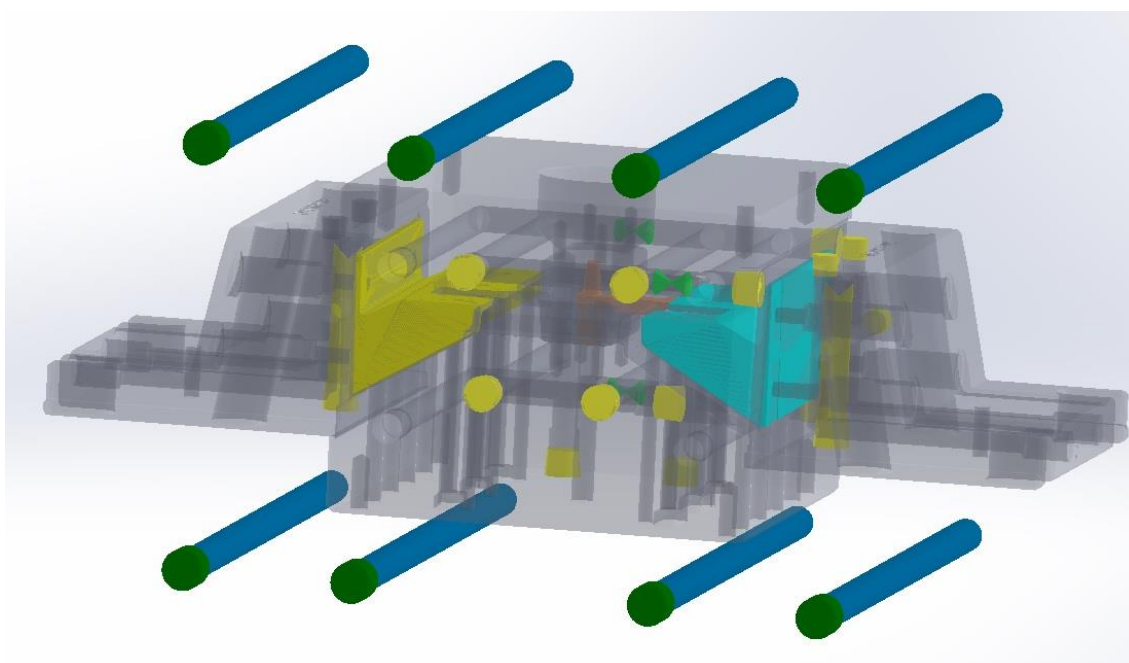


Figura 4.15 – Disposição das resistências do molde

4.4.5 Fugas de Gases

A empresa onde foi feito o projeto do molde e o molde não tem por regra incluir as fugas de gases no projeto, deixando essa tarefa para o operário da bancada responsável pela finalização, montagem e aperfeiçoamento do molde. Assim, do projeto do molde resultam apenas os canais de escape de gases na cavidade (Figura 4.16), na bucha e nos elementos móveis (Figura 4.17).

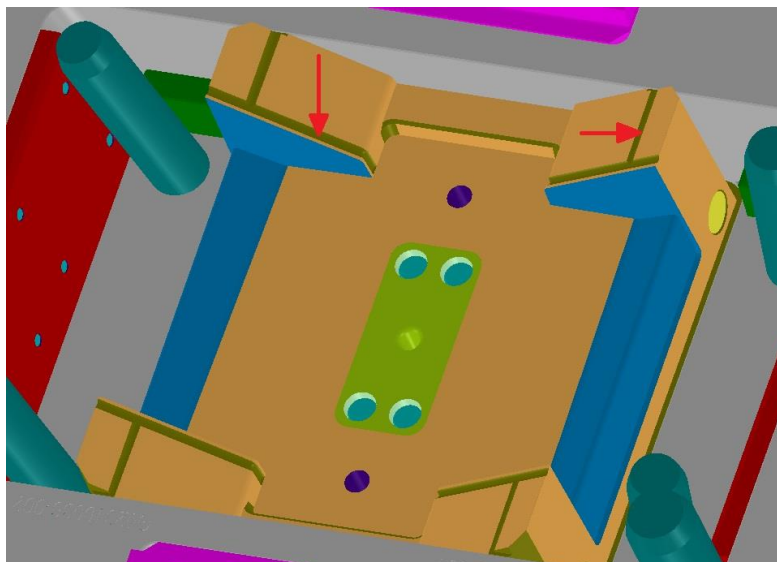


Figura 4.16 – Canais de fugas de gases do lado da cavidade.

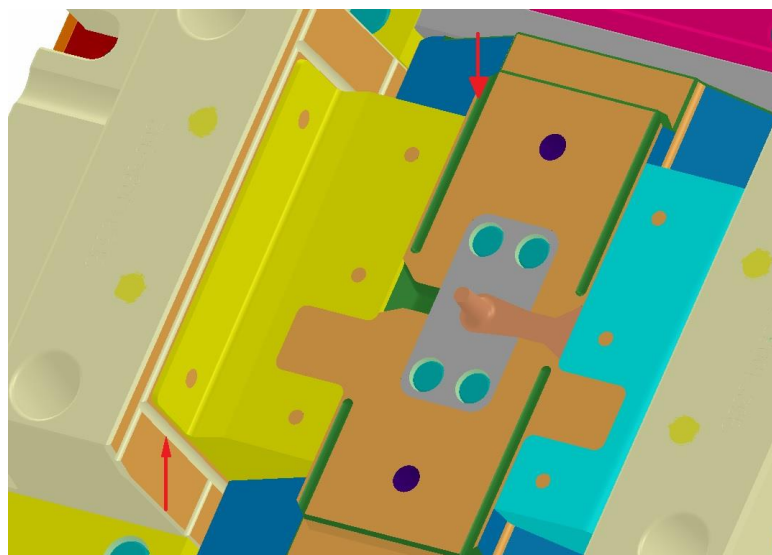


Figura 4.17 – Canais de fugas de gases do lado da bucha e dos elementos móveis.

4.4.6 Placas isolantes

Devido ao tipo de molde e material em questão, é necessário manter o molde a uma temperatura constante de aproximadamente 200°C, que representa uma temperatura bastante elevada quando comparado com outro tipo de moldes. Para evitar a perda de calor do molde para o exterior, são colocadas chapas isolantes em torno de todo o molde, a laranja na Figura 4.18.

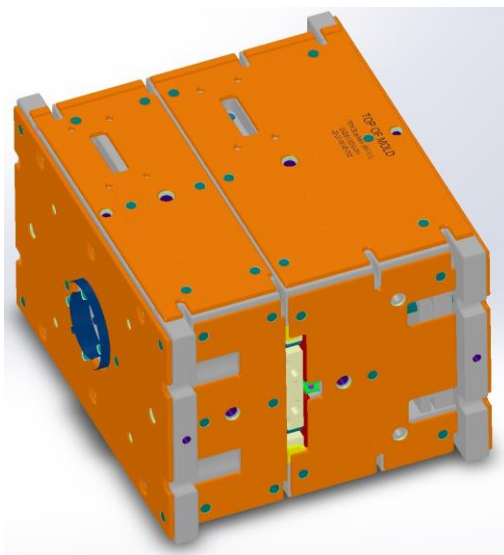


Figura 4.18 – Ilustração das placas isolantes no molde.

Quanto menor for a condução térmica das placas, mais isolantes são e melhor irão cumprir o pretendido no funcionamento do molde. Para este molde, foram escolhidas as placas isolantes VOLTIS HP 2061 com 6mm de espessura, não só pelas boas propriedades isolantes como também pela cor apresentada (castanho) que após a maquinação permite observar com clareza as legendas inscritas, tais como entradas e saídas de água, tipos de roscas dos olhais, etc. As propriedades destas placas são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Propriedades das placas isolantes VOLTIS HP 2061.

Propriedade	Valor	Unidade
Condutividade térmica	0,2	W/m.K
Densidade	1,4	g/cm ²
Tensão de cedência	120	MPa
Tensão de rotura	150	MPa
Módulo de elasticidade	9	GPa
Resistência Térmica	120	T.I.

4.5 Simulação Moldex3D

4.5.1 Moldex3D Designer

Para prevenir eventuais erros de projeto, é comum utilizar-se programas de simulação numérica por elementos finitos. No entanto, dado o elevado custo associado a um estudo desta natureza, apenas são efetuados quando há uma exigência especial por parte do cliente ou quando é mesmo necessário. Com esta dissertação pretende-se demonstrar que podem e devem ser utilizadas as ferramentas disponíveis para o auxílio do projeto, de modo a evitar perdas de tempo e custos relacionados com correções após o primeiro teste, por pormenores mínimos que seriam

evitados com um simples estudo. Nesta dissertação, fez-se uma análise completa do molde M1724 (neste caso, após o desenho preliminar estar concluído), cujos resultados serão mais adiante comparados com os resultados reais, após o teste do molde.

Para realizar uma simulação utilizando o Moldex3D, é necessário, numa primeira fase, criar a malha de estudo no Moldex3D Designer. Iniciou-se por importar a peça para o Moldex3D Designer, e fez-se uma verificação das superfícies para detetar e corrigir eventuais defeitos da peça ou da conversão de formato do ficheiro. De seguida importou-se o ficheiro do ataque e do canal de alimentação, que podem também ser criados dentro do software, e é depois definida a face por onde entra o material “*melt entrance*”. Deve ser tido em atenção que antes de se colocar os ficheiros dos componentes estes devem ser exportados do *software* de modelação garantindo que todos possuem o mesmo referencial, de modo a que as uniões entre os elementos sejam perfeitas.

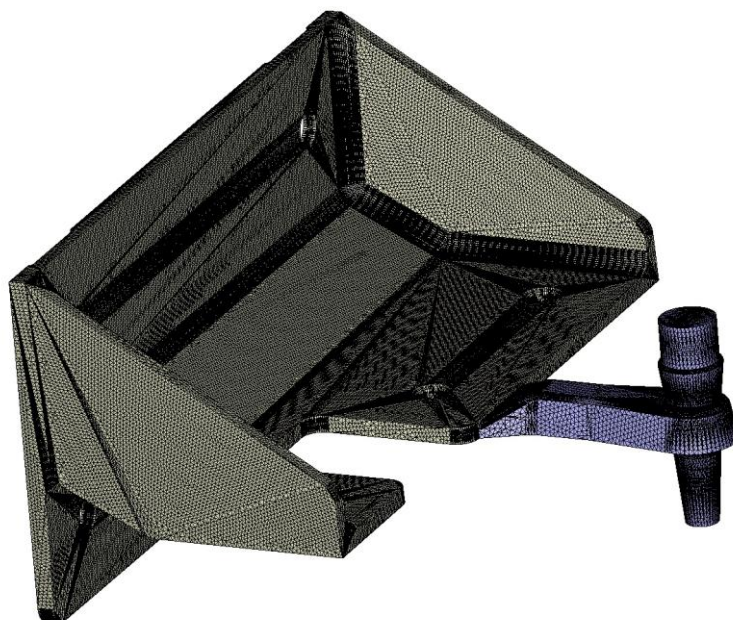


Figura 4.19 – Peça e ataque em malha (Moldex3D Designer).

Após a importação da peça e colocação/criação do ataque e canal de alimentação, é necessário criar o chamado “*moldbase*” que corresponde às dimensões exteriores do molde, excluindo a zona das placas de extração.

O que poderá ser mais moroso neste processo será criar os canais de refrigeração, se ainda não estiverem modelados, caso estejam, podem ser importados. Mas também se pode pedir uma sugestão prática e simples e o programa cria os canais automaticamente. Neste caso, foram feitos os canais de acordo com o projeto do molde. De notar que o vazio do lado direito da imagem corresponde ao local onde se colocaria a outra peça, mas como é injetada apenas uma de cada vez, a injeção é feita de acordo com a simulação apresentada (Figura 4.20).

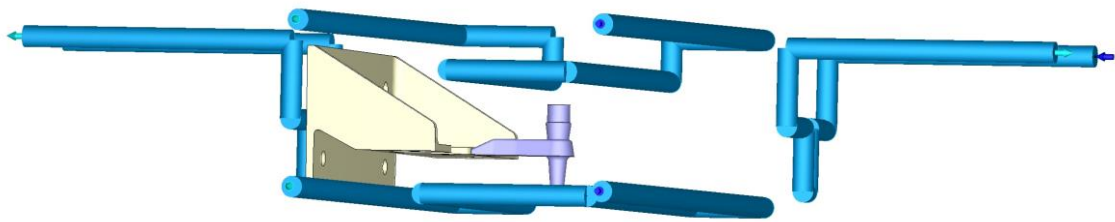


Figura 4.20 – Canais de refrigeração com entradas e saídas indicadas (Moldex3D Designer).

De modo a aproximar ao máximo à realidade o circuito de refrigeração, foi também tipo em consideração o pormenor do circuito em cascata com lâmina separadora (palheta) nos elementos móveis, criando o mesmo no Moldex3D Designer com as suas especificações (Figura 4.21).

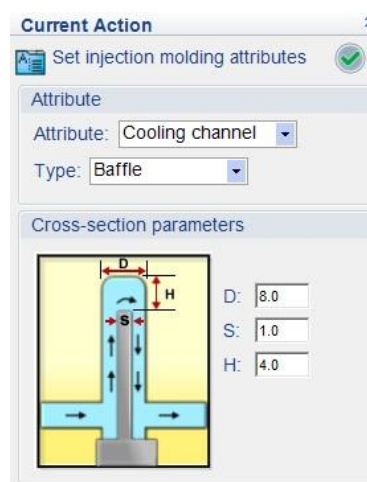


Figura 4.21 – Especificação do pormenor do circuito com palheta na refrigeração do elemento móvel.

Depois de se definirem as entradas e saídas dos canais de refrigeração, criam-se as resistências de 12,7mm de diâmetro (este molde tem 4 em cada lado, conforme ilustrado na Figura 4.22).

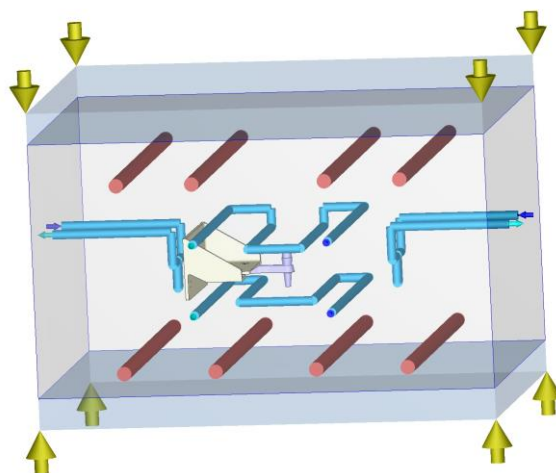


Figura 4.22 – Conjunto criado para a simulação. (Moldex3D Designer).

Fez-se uma verificação para garantir a conformidade e depois o programa gera a malha de elementos finitos automaticamente, escolhendo o nível de precisão do refinamento da malha. Neste caso utilizou-se o nível 4 de uma escala de 1 a 5.

Feita a preparação do design do molde necessária ao estudo de simulação, é exportada a malha para que seja depois importada no Moldex3D.

4.5.2 Moldex3D

Ao iniciar a criação da análise, introduziu-se a malha, e de seguida o material. Resta depois introduzir os parâmetros de processo e os parâmetros de computação. De modo a simplificar, estão representados na Tabela 4.5 os valores introduzidos.

Tabela 4.5 – Parâmetros introduzidos na simulação do Moldex3D.

Parâmetro	Valor
Tempo de enchimento	0,5 s (perfil linear)
Tempo de compactação	10 s (perfil linear)
Temperatura do fundido	365 °C
Temperatura do molde	205 °C
Tempo de arrefecimento	30 s
Tempo de abertura do molde	5 s
Temperatura do ar	25 °C
Caudal do fluido de refrigeração (óleo)	10 l/min
Temperatura do fluido de refrigeração	220 °C
Temperatura das resistências	215 °C
Material do molde	1.2344

Os valores para a análise inicial, no momento do projeto, foram introduzidos com base na análise feita em no Capítulo 4.1, que permitiu observar dados de moldes semelhantes, com geometrias similares e mecânicas idênticas. Estes valores não se afastaram muito dos efetivamente utilizados no 1º teste do molde, após o qual o estudo foi refeito.

Os valores de tempo de enchimento, compactação, arrefecimento e de abertura do molde foram os que acabaram por ser utilizados. O único que não é um *input* na máquina é o de injeção, dado que no teste de utiliza a velocidade máxima de injeção, sendo o tempo de enchimento o resultado de quando a cavidade está preenchida, mas este foi de exatamente 0,50 segundos, tal como o previamente suposto. Os outros valores introduzidos, apesar de serem introduzidos na máquina, podiam eventualmente ter que ser alterados para melhorar as condições e/ou a qualidade do produto, embora se tenham revelado bastante satisfatórios.

O maior inconveniente desta ferramenta é o tempo de computação elevado. No capítulo 5 é abordado esse tema com mais profundidade.

4.6 Fabrico do molde

O fabrico do molde envolve múltiplas etapas, desde maquinagem de peças, têmpera, furação, textura, acabamento de superfície, ajustamento, compra e montagem de acessórios, montagem do molde, etc. Estes aspetos não fazem parte do objetivo desta dissertação, pelo que não irão ser abordados. Contudo, supor-se-há que não há falhas neste sentido e que tudo é respeitado. Caso contrário, no momento do teste detetar-se-ão eventuais falhas nestas etapas.

4.7 Teste 1 do molde

Após a conceção do molde, este necessita de ser testado e consequentemente aprovado pelo cliente, para que possa ser exportado e o processo concluído.

De acordo com o estipulado na Tabela 4.3, o molde deveria ser testado dia 24-04-2015. No entanto, o teste aconteceu apenas no dia 28-04-2015, não por atrasos no projeto, mas sim por questões de logística, para que os clientes pudessem assistir ao maior nº de testes possível na sua presença, cuja chegada se sucedeu nesse mesmo dia. Antes de ser iniciado o teste, o material a injetar (PEEK ESD101) teve que ser estufado/desumidificado a uma temperatura de 150 °C durante 5 horas.

A máquina prevista para o funcionamento do molde é da marca Ferromatik, modelo 110ton. No teste, foi utilizada uma máquina de injeção da marca Sandretto, modelo 125ton, representada na Figura 4.23.



Figura 4.23 – Máquina de injeção utilizada no teste do molde M1724, Sandretto serienove 125.

Dado que a sua força de fecho é superior à da máquina do cliente, limitou-se a força à força máxima da Ferromatik, ou seja, 110 toneladas.

O molde foi colocado na máquina (Figura 4.24) e foram respeitadas as condições usuais de implementação de parâmetros para este tipo de moldes, até se atingir o compromisso adequado ao melhor produto final possível.

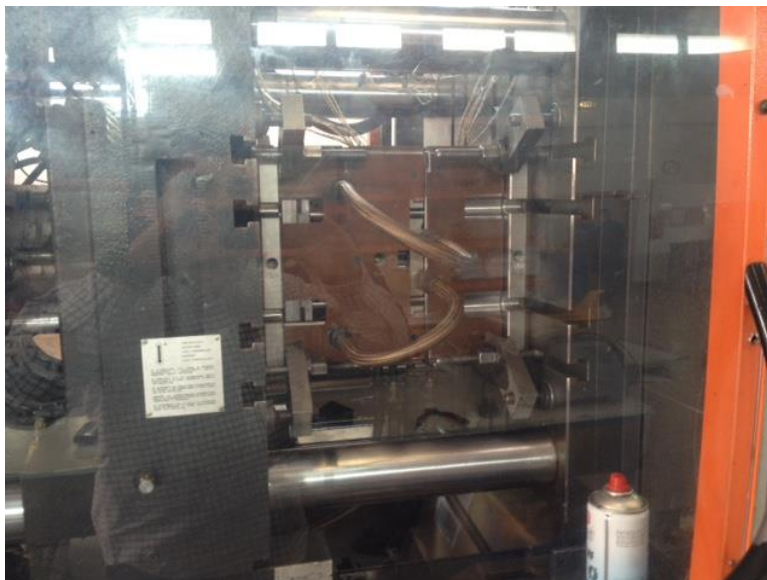


Figura 4.24 – Molde M1724 na máquina de injeção, a aquecer para se iniciar o 1º teste.

Para aquecer o molde, são utilizadas as resistências a uma temperatura de 215°C e o óleo de refrigeração a 220°C (Figura 4.25), utilizando um controlador de temperatura Regloplas RT50 Type 350L capaz de elevar o óleo a temperaturas na ordem dos 300°C (os controladores de temperatura comuns nas empresas de injeção possuem um limite máximo de 180°C).



Figura 4.25 – Controlador de temperatura com valor estabelecido de 220°C.

O óleo utilizado foi o Global Oils Heat Transfer Oil 5-32 cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Propriedades do óleo 5-32 utilizado

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	0,870	g/cm ³
Viscosidade (100°C)	5,4	cSt
Índice de viscosidade	100	-
Flash Point	220	°C
Pour Point	-15	°C

Após a estabilização do molde à temperatura pretendida e a colocação do material na tremonha após a estufa/desumidificação, estão reunidas as condições para iniciar a produção de peças no molde.

Iniciou-se por injetar a peça com quantidades reduzidas de material, fazendo pequenos incrementos entre injeções, de modo a verificar o padrão de enchimento, até que a peça ficasse completa (Figura 4.26), para que depois seja introduzida uma pressão de compactação.



Figura 4.26 – Sequência do enchimento da peça.

Obtendo o melhor possível, após ajustados os parâmetros, as condições de injeção são as seguintes:

Tabela 4.7 – Condições finais do 1º teste do M1724.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tempo de injeção	0,51	Segundos
Tempo de 2ª pressão	10	Segundos
Tempo de arrefecimento	30	Segundos
Tempo de ciclo	49,4	Segundos
Pressão de injeção (específica)	1952	Bar
Pressão de compactação (específica)	617	Bar
Pressão de comutação (específica)	1293	Bar
Dosagem	3,84	Segundos
Curso de material	41	mm
Corte	16	mm
Almofada	10,4	mm
Contra-Pressão	10	Bar
Descompressão	7	mm
Rotação do fuso	100	Rpm
Temperatura da cavidade	208	°C
Temperatura da bucha	207	°C
Temperatura dos elementos móveis	196	°C
Temperatura do fundido na ponta do bico da máquina	365	°C
Temperatura do fluido de refrigeração (óleo)	220	°C

Obtidas as melhores condições, pode-se constatar que alguns defeitos verificados nas peças seriam impedimento de aprovação do molde para exportação:

- A peça possui alguns queimados em zonas-chave (1), aquelas onde, de acordo com o padrão de enchimento, seriam as últimas a encher, necessitando de fugas de gases apropriadas;
- Apresenta polimento deficiente na parede que é moldada pelo elemento móvel (vermelho);
- Existem algumas rebarbas em volta da peça, na junta do elemento móvel. Injetou-se uma amostra com 2ª pressão de 80 bar ao invés de 60 bar para evidenciar a existência de rebarbas (3).

A Figura 2.1Figura 4.27 representa a imagem com as anotações das zonas da peça que correspondem aos locais do molde onde deveriam ser feitas as correções.

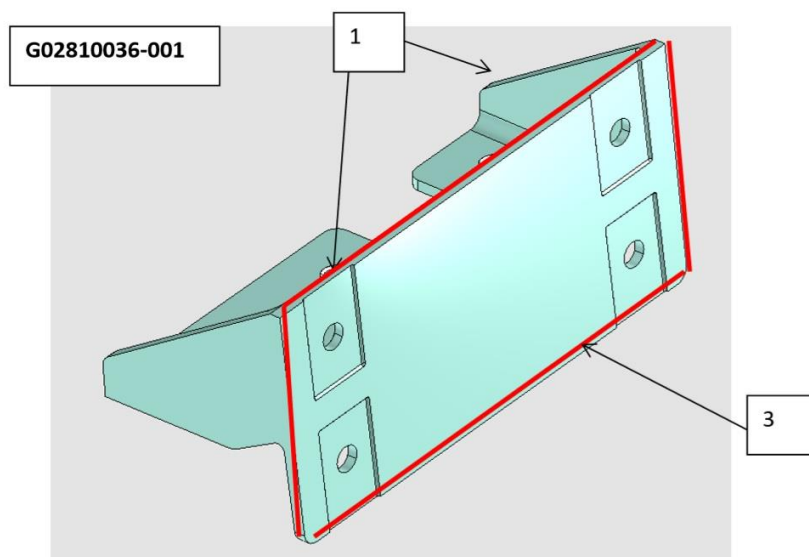


Figura 4.27 – Ilustração dos comentários feitos ao teste 1.

Os defeitos na peça mencionados em cima são visíveis a olho nú, na peça injetada no teste 1. As fugas insuficientes causaram os “queimados” visíveis na Figura 4.28, por outro lado, a deficiência de polimento provocou as marcas na Figura 4.29. Já as rebarbas são visíveis na Figura 4.30.

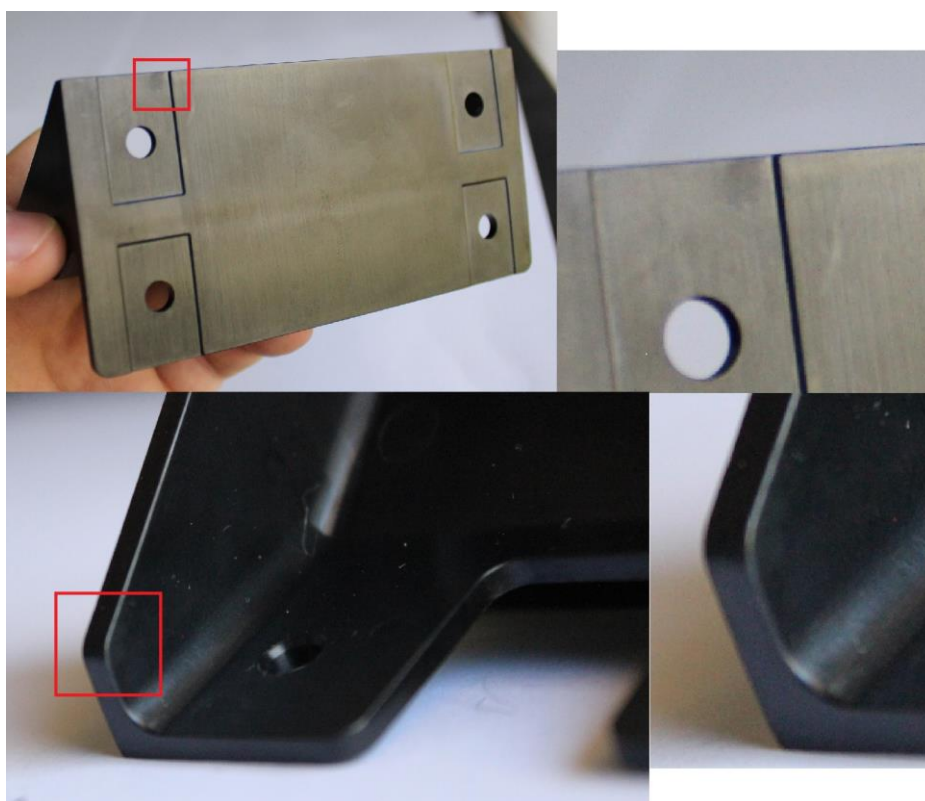


Figura 4.28 – Marcas de queimados pela falta deficiência de fugas de gases.

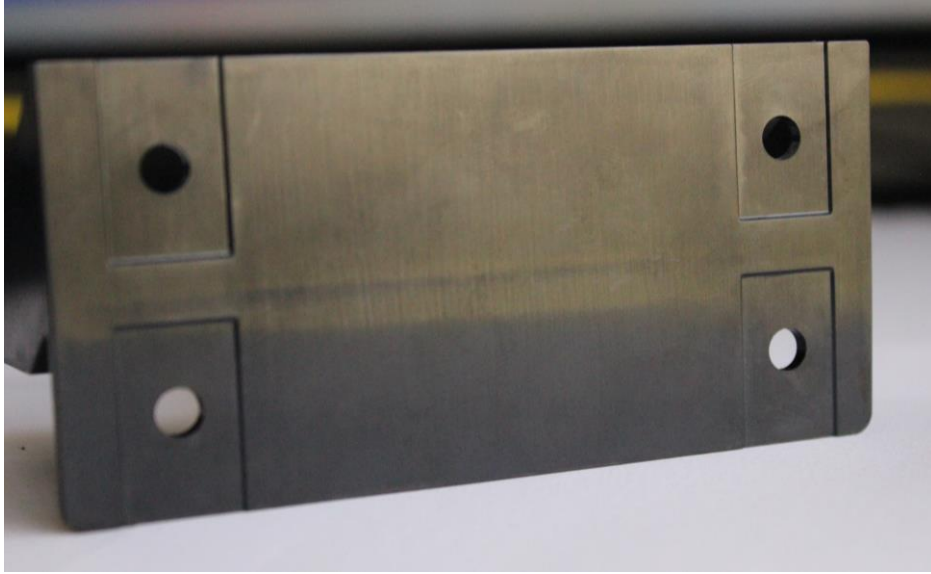


Figura 4.29 – Polimento deficiente na superfície da peça moldada pelo elemento móvel.

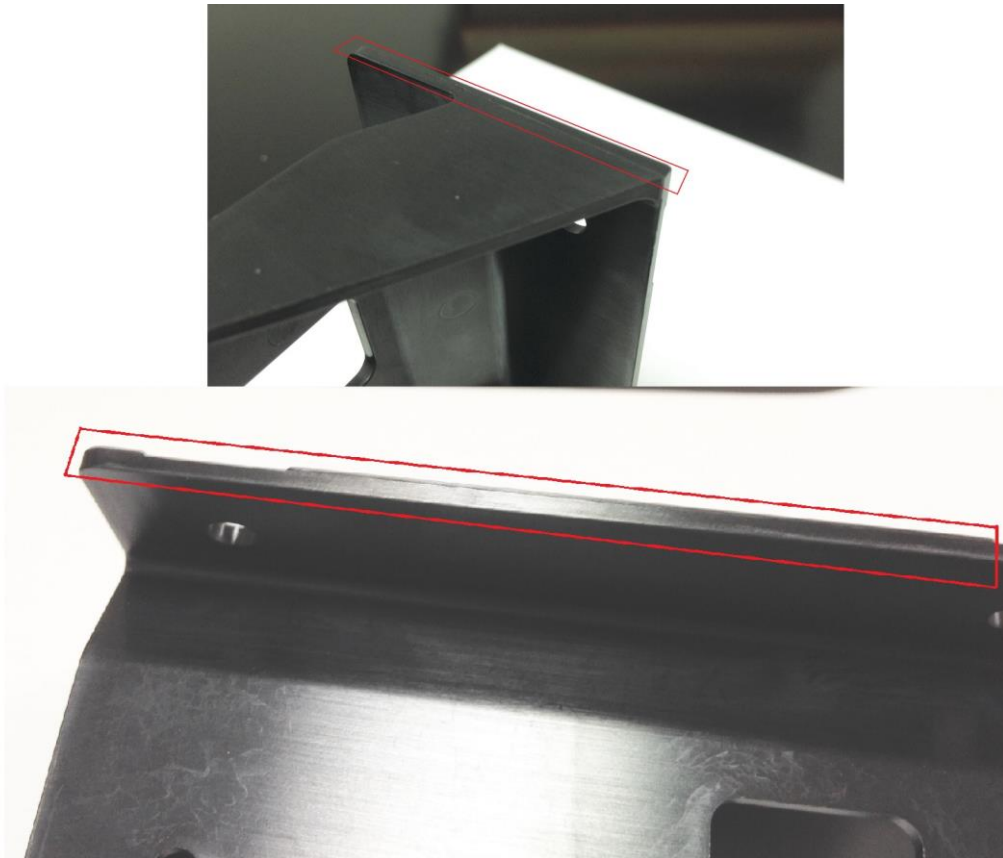


Figura 4.30 – Rebarbas à junta entre o elemento móvel e a cavidade.

4.8 Correções ao teste 1 do molde

Após o teste, o molde volta para o fabricante e são analisadas as correções e observadas as falhas que se devem corrigir:

- Relativamente às rebarbas, foi feito um melhor e mais cuidado ajustamento entre as juntas, pois esta é a operação mais complexa de todo o projeto de um molde, sendo necessária mão-de-obra muito especializada.
- O polimento foi melhorado com a lixa 400, de acordo com as iniciais especificações do projeto do molde.
- As fugas de gases são de facto um aspecto que é solucionado por tentativa-erro. No entanto, olhando para os locais de queimados nas peças, é possível ver onde se devem melhorar as fugas de gases, que após o primeiro teste estavam localizadas nas zonas do elemento móvel representadas na Figura 4.31, e as fugas da aba lateral da peça, localizadas na bucha, encontram-se representadas na Figura 4.32. De notar que os rasgos das fugas correspondem às áreas que não estão pintadas de vermelho, o vermelho é pó de zarcão que se coloca para fazer o ajustamento de material. Como na fuga não é suposto a junta se tocar, não fica pintado de vermelho pelo encosto.



Figura 4.31 – Rasgos para fugas no elemento móvel, após o primeiro teste.

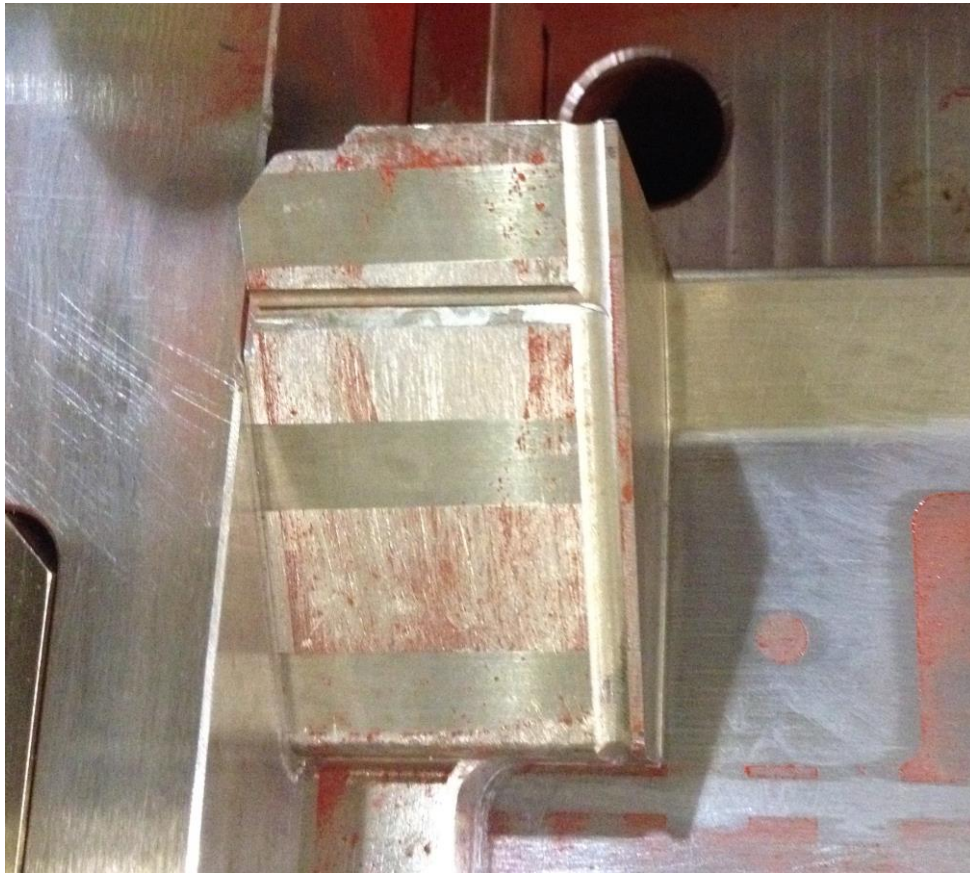


Figura 4.32 – Rasgos para fugas na cavidade, após o primeiro teste.

Como se pode ver na Figura 4.32, e comparando com a imagem de queimado na aba lateral na Figura 4.28, a zona onde está queimada corresponde ao espaço entre as duas fugas. Dado que o queimado era de baixa intensidade, apenas se alargou a fuga de baixo, de modo a haver uma fuga no ponto previamente queimado.

Verificando o queimado do topo da Figura 4.28, este bastante mais acentuada que o anterior, foi necessário também alargar o rasgo da fuga para a zona que estava marcada, mas, devido à intensidade do queimado, foi necessário aprofundar a fuga de 0,025mm para 0,035mm. Após as alterações, o elemento móvel apresentava as fugas conforme ilustrado na Figura 4.33.



Figura 4.33 – Rasgos para fugas no elemento móvel, após as correções.

4.9 Teste 2 do molde

Após as alterações, efetuou-se um novo teste, este já sem a presença do cliente, no dia 22-05-2015.

Para o teste, utilizou-se a mesma máquina de injeção, o material foi estufado nas mesmas condições e fez-se o teste, registando novos parâmetros de injeção, descritos na Tabela 4.8, bastante aproximados aos registados no 1º teste.

Tabela 4.8 – Condições finais do 2º teste do M1724.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tempo de injeção	0,5	Segundos
Tempo de 2ª pressão	10	Segundos
Tempo de arrefecimento	30	Segundos
Tempo de ciclo	48,5	Segundos
Pressão de injeção (específica)	1952	Bar
Pressão de compactação (específica)	719	Bar
Pressão de comutação (específica)	1038	Bar
Dosagem	3,74	Segundos
Curso de material	41	mm
Corte	16	mm
Almofada	9,9	mm
Contra-Pressão	10	Bar
Descompressão	7	mm
Rotação do fuso	100	Rpm
Temperatura da cavidade	205	°C
Temperatura da bucha	209	°C
Temperatura dos elementos móveis	196	°C
Temperatura do fundido na ponta do bico da máquina	360	°C

Findo o teste, as peças apresentavam-se em boas condições, e todos os aspetos mencionados no fim do 1º teste haviam sido corrigidos. É possível ver que já não há existência de queimados nos locais assinalados, em cima, junto ao furo (Figura 4.34) e na aba lateral (Figura 4.35).

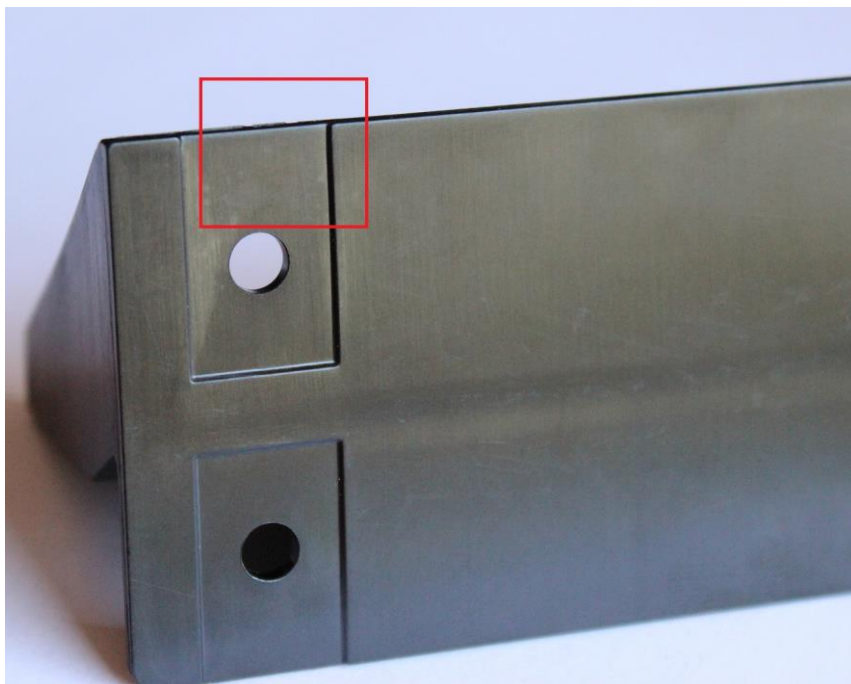


Figura 4.34 – Ausência de fugas na primeira região queimada no teste 1.

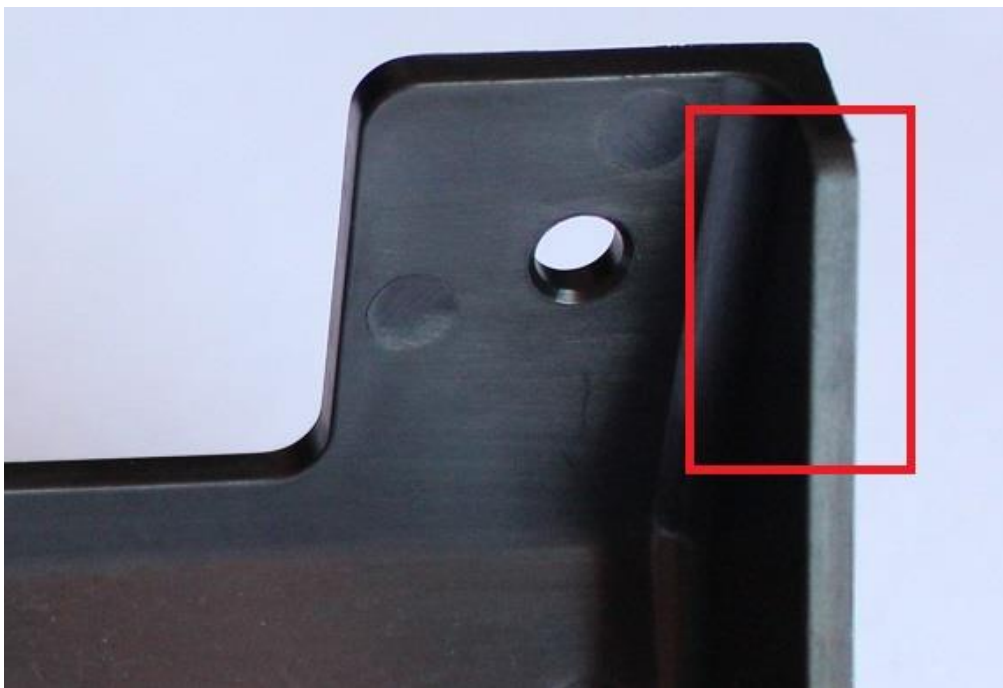


Figura 4.35 - Ausência de fugas na segunda região queimada no teste 1.

Verificou-se uma grande melhoria no polimento, indo ao encontro do pretendido, conforme se pode verificar na Figura 4.36.



Figura 4.36 – Melhoria do polimento observado.

Relativamente às rebarbas na junta do elemento móvel, estas foram eliminadas nas correções, e a peça apresenta assim todas as condições para a aprovação por parte do cliente final, que terá que as aprovar para que o molde seja exportado. Na Figura 4.37 apresentam-se algumas fotografias tiradas às peças com as condições enviadas para o cliente final para aprovação.

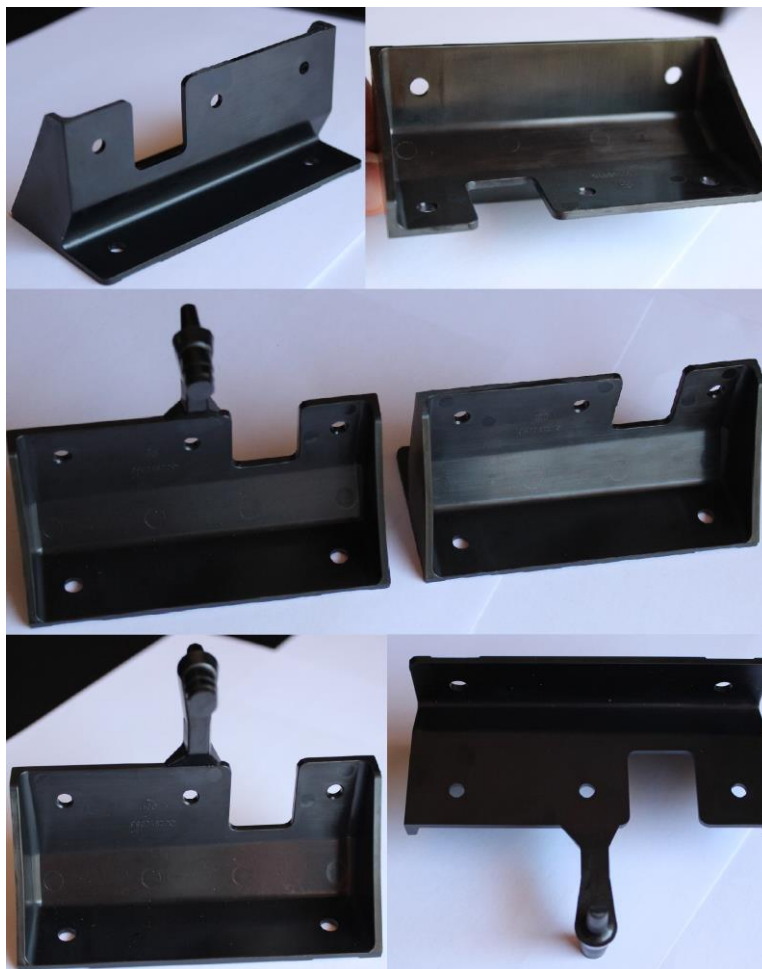


Figura 4.37 – Produto final obtido no fim do 2º teste do molde M1724 (THP Brackets G02810036-001).

O molde M1724 foi aprovado para exportação por parte do cliente, após a sua verificação das peças. Conseguiu-se então que o molde fosse aprovado no 2º teste, que se encontra abaixo da média registada de 3,27 testes.

5 Resultados

Os resultados obtidos utilizando o Moldex3D foram apenas utilizados a partir do 1º teste, para que fosse possível observar as falhas que poderiam ser precavidas utilizando este *software* de simulação por elementos finitos. Resolvendo-se as mesmas por comparação com os resultados.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo Moldex3D relativamente ao projeto do molde M1724, através dos quais se compara com os resultados reais nos testes dos moldes e se pretende demonstrar a utilidade e fiabilidade desta ferramenta como auxílio no projeto de moldes de injeção.

Os resultados de uma análise completa utilizando o Moldex 3D estão distribuídos por 4 capítulos:

- Enchimento;
- Compactação;
- Arrefecimento;
- Empeno.

Como se pretende comparar a peça após a extração (momento em que é possível observar fisicamente a peça), e sendo os parâmetros e tipo de resultados do Enchimento e da Compactação os mesmos, analisam-se os dados após a compactação para aproximar ao máximo à realidade, denominando por enchimento o conjunto.

5.1 Resumo do Cálculo

Durante e após a simulação, é apresentada a seguinte janela (Figura 5.1). O maior entrave à utilização da simulação é o tempo necessário durante a mesma em processamento. Dado que, com alguma experiência, a criação da malha no Moldex3D Designer, a sua exportação e o input de parâmetros no Moldex 3D não excede a duração de uma hora, e deparando-se com o tempo de simulação que, neste caso, foi de 5 horas, 9 minutos e 36 segundos. No entanto, estes valores referem-se a uma análise completa, que engloba o enchimento, compactação, arrefecimento e empeno. A análise que deve ser necessária em qualquer projeto é a de enchimento que, neste caso, teve a duração de 1 hora, 37 minutos e 8 segundos, que não representa um tempo muito elevado de cálculo, não sendo um entrave que possa atrasar o projeto. O estudo foi efetuado utilizando uma licença educacional que apenas permite dispor de 4 núcleos, o equipamento utilizado possui 32Gb de *Ram* e um disco *SSD*. Este tempo pode ser reduzido utilizando uma licença mais avançada e *hardware* do computador mais avançado também.

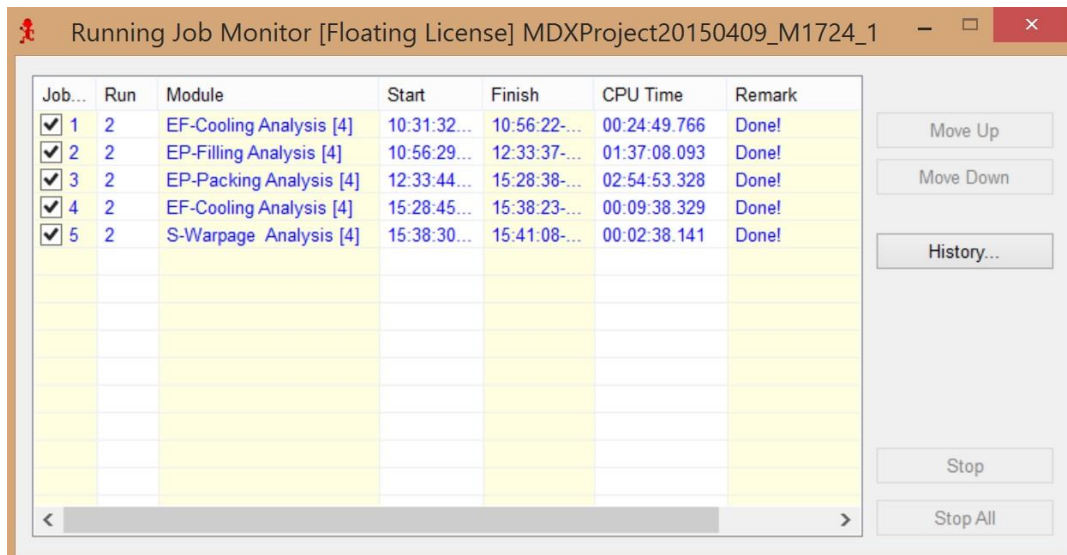


Figura 5.1 – Resumo do enchimento, duração das etapas da simulação.

5.2 Enchimento

O enchimento da peça, possível de ser exportado em vídeo em quantas projeções se pretender, permite retirar algumas conclusões que podem ajudar a tomar decisões para o projeto ou até mesmo levar a alterações em aspetos previamente estabelecidos. Assim: a análise da frente do fundido ao longo do tempo de enchimento permite:

- Examinar o padrão de enchimento da moldação;
- Verificar potenciais zonas que ficam por preencher por variados motivos;
- Identificar a existência e consequente localização das linhas de soldadura;
- Identificar a existência e localização das zonas de prisão de ar, em que devem ser criadas as fugas de gases;
- Verificar se a localização do ataque é adequada relativamente ao balanceamento do enchimento e à eliminação de linhas de soldadura, se possível.

5.2.1 Padrão de Enchimento

Observando os resultados do enchimento da cavidade do molde, e comparando os mesmos em vários estágios da injeção, é possível notar que o padrão de enchimento calculado pelo Moldex3D é bastante aproximado das peças injetadas com incrementos de material reduzidos, durante o 1º teste. (Figura 5.2 a Figura 5.10).

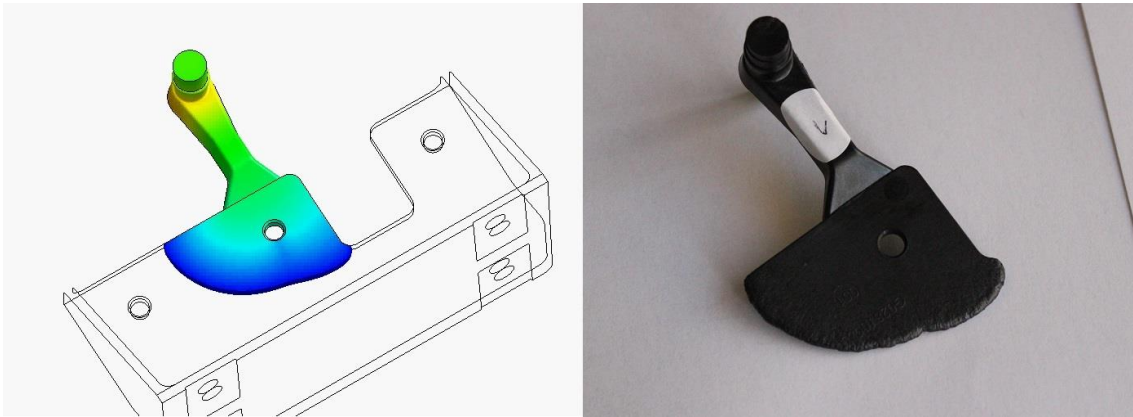


Figura 5.2 – Comparação da amostra 1 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

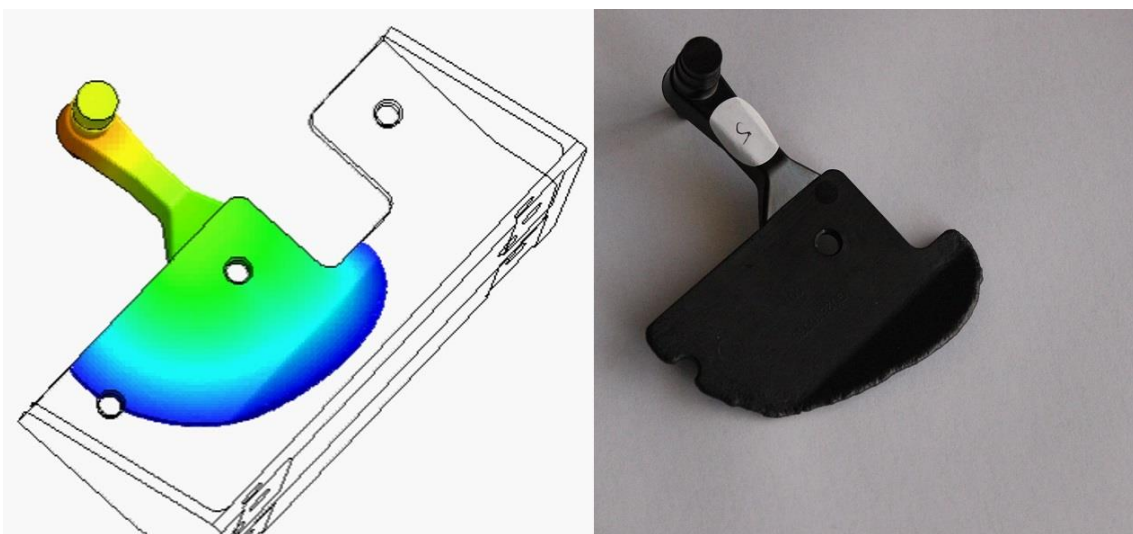


Figura 5.3 – Comparação da amostra 5 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

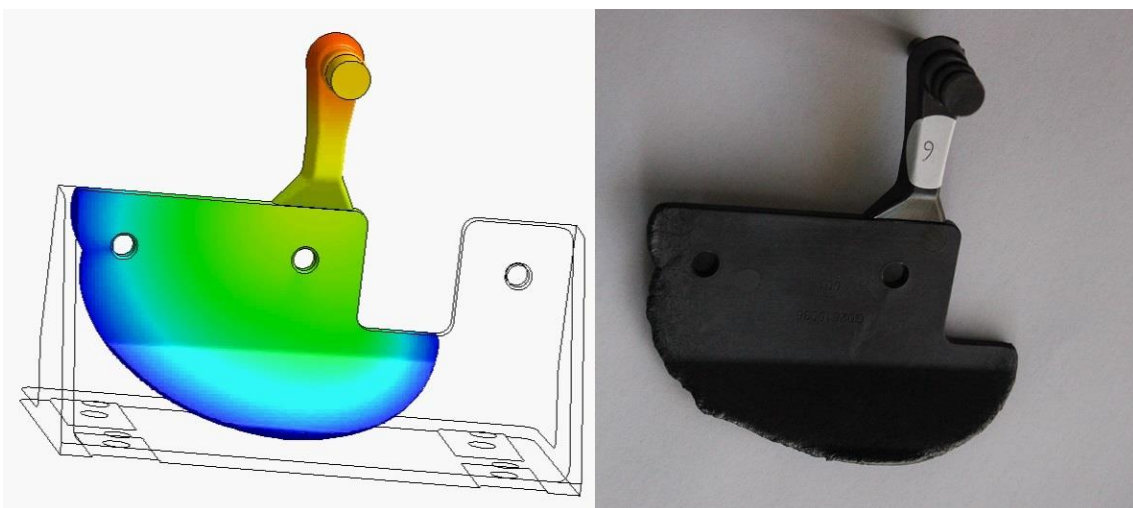


Figura 5.4 – Comparação da amostra 6 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

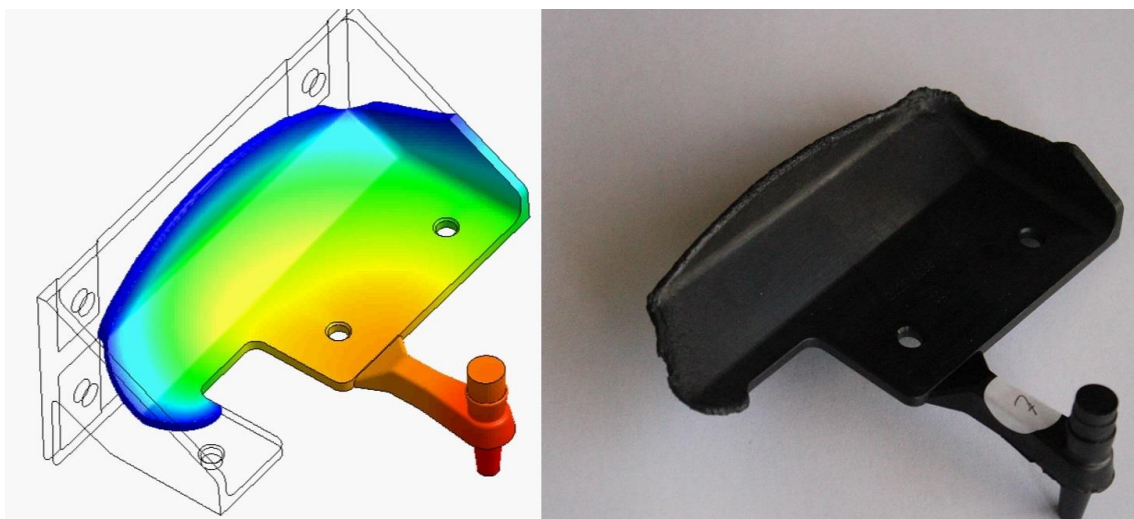


Figura 5.5 – Comparação da amostra 7 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

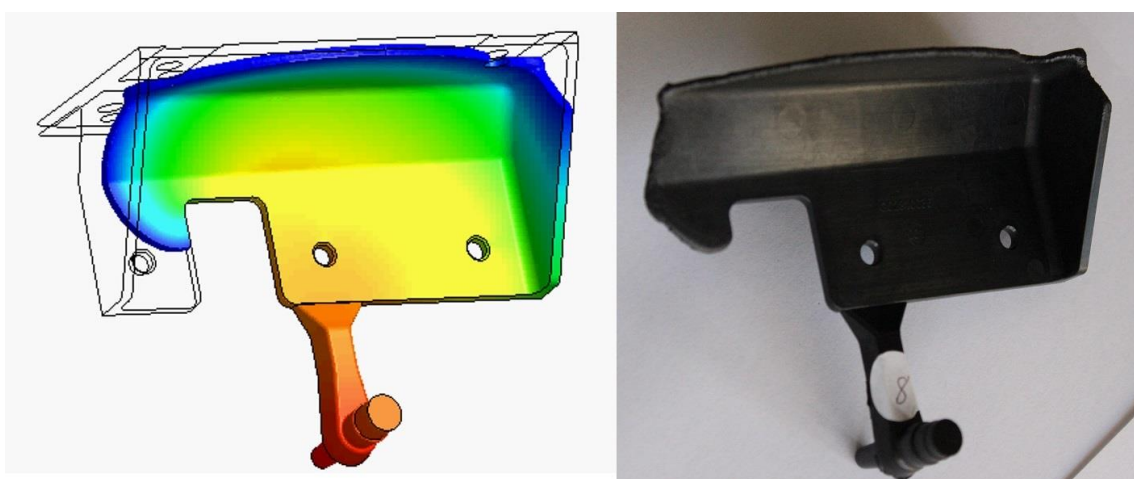


Figura 5.6 – Comparação da amostra 8 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

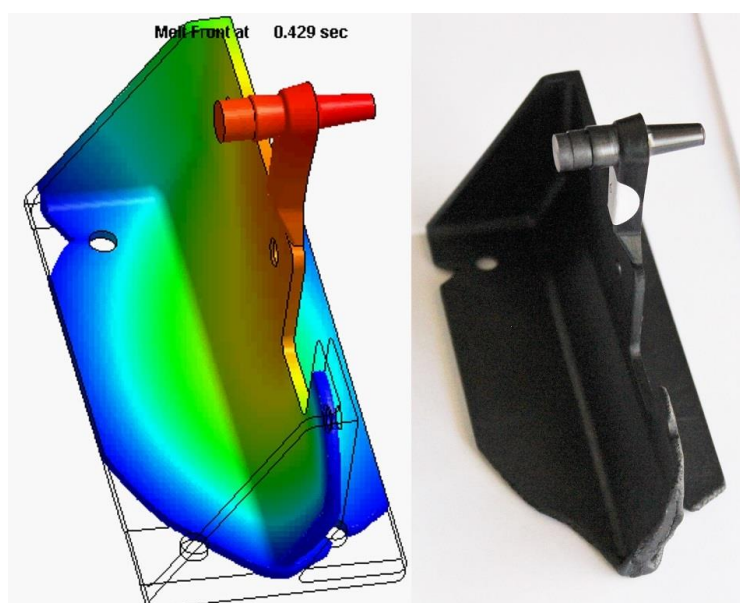


Figura 5.7 – Comparação da amostra 9 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

Na Figura 5.8 é possível observar algumas diferenças no enchimento, afastando um pouco a localização da fuga de gases. Esta diferença está relacionada com as fugas de gases já existentes no molde, que não estão introduzidas no estudo. A existência de ar dentro da cavidade cria resistência ao escoamento do fluido na simulação, apresentando assim algumas diferenças.

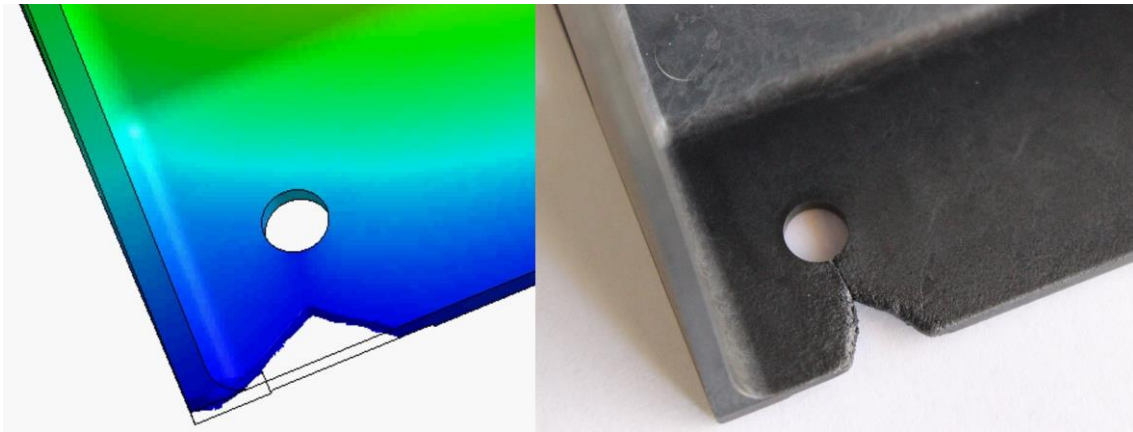


Figura 5.8 – Detalhe do enchimento da amostra “9” numa zona crítica do enchimento.

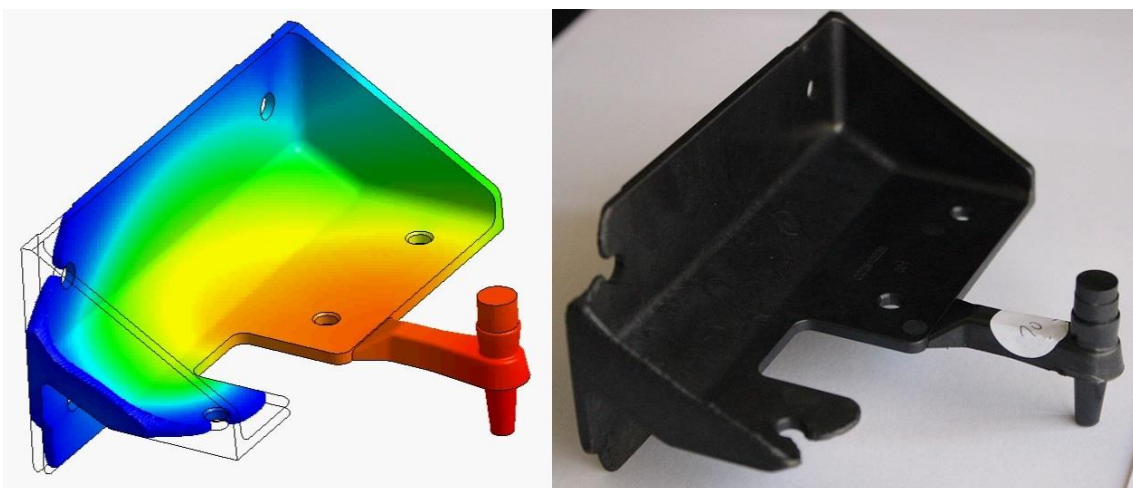


Figura 5.9 – Comparação da amostra 10 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

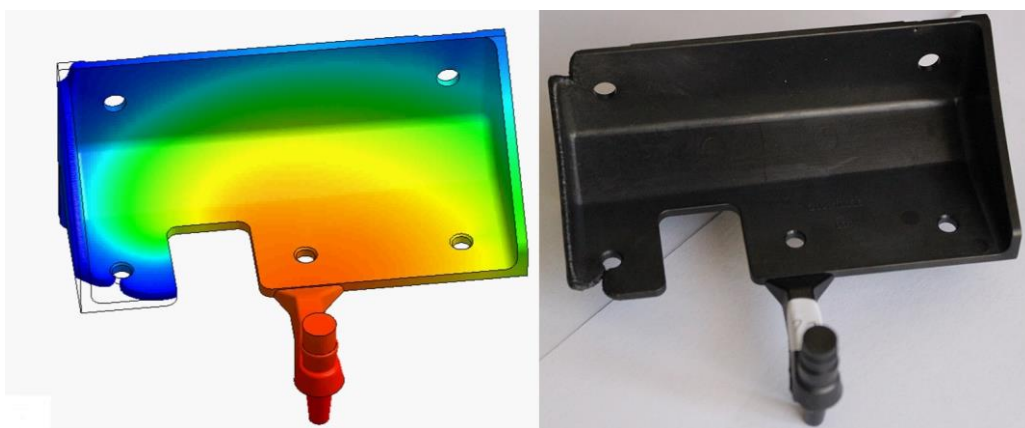


Figura 5.10 – Comparação da amostra 11 com o estágio equivalente da simulação da injeção.

5.2.2 Linhas de Soldadura

Relativamente às linhas de soldadura, nesta peça elas apenas existem nos contornos dos furos, pois é onde o material se separa e se volta a unir após contornar o aço que cria os furos. Assim, é possível ver na Figura 5.11 e na Figura 5.12 a localização das linhas de soldadura após a injeção da peça.



Figura 5.11 – Linhas de soldadura junto dos furos dos elementos móveis

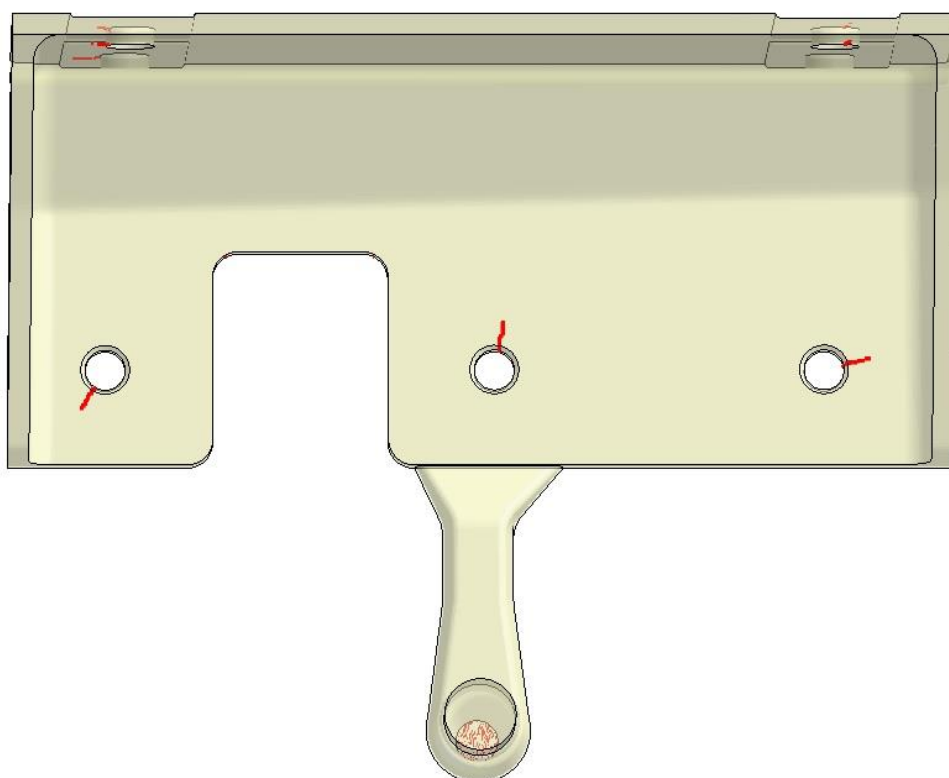


Figura 5.12 – Linhas de soldadura junto dos furos criados pela bucha.

Estas localizações poderiam ser alteradas se se alterasse o local da injeção e/ou o tipo de ataque. No entanto, as linhas não iriam desaparecer pois existem sempre linhas de soldadura após os furos e, além disso, neste caso em concreto, o tipo e a localização do ataque foi uma especificação dada e exigida pelo cliente, pelo que este resultado, apesar de bastante útil, não pode criar alterações no projeto do molde M1724.

5.2.3 Fugas de Gases

As fugas de gases, correspondentes aos locais onde ocorrem prisões de ar, de acordo com o resultado obtido no Moldex3D, devem estar localizadas nas zonas onde há linhas de soldadura (pois existe uma prisão de ar nesse local). Podem ser observadas, sob pontos laranja na superfície da peça, na Figura 5.13 e na Figura 5.14.

Segundo os resultados, é também aconselhável fazer fugas em certas zonas da peça observadas nas mesmas figuras, devido a serem zonas terminais de enchimento, em que ocorre prisão de ar. Na Figura 5.15 é ainda possível observar o detalhe da fuga necessária (círculo a vermelho), na zona que se verificou no 1º teste que apresentava um queimado bastante acentuado (Figura 4.28). Utilizando estes resultados para o projeto, essa falta/insuficiência de fugas de gases teria sido evitada, contribuindo para a redução do nº de testes necessários até à aprovação do molde M1724.

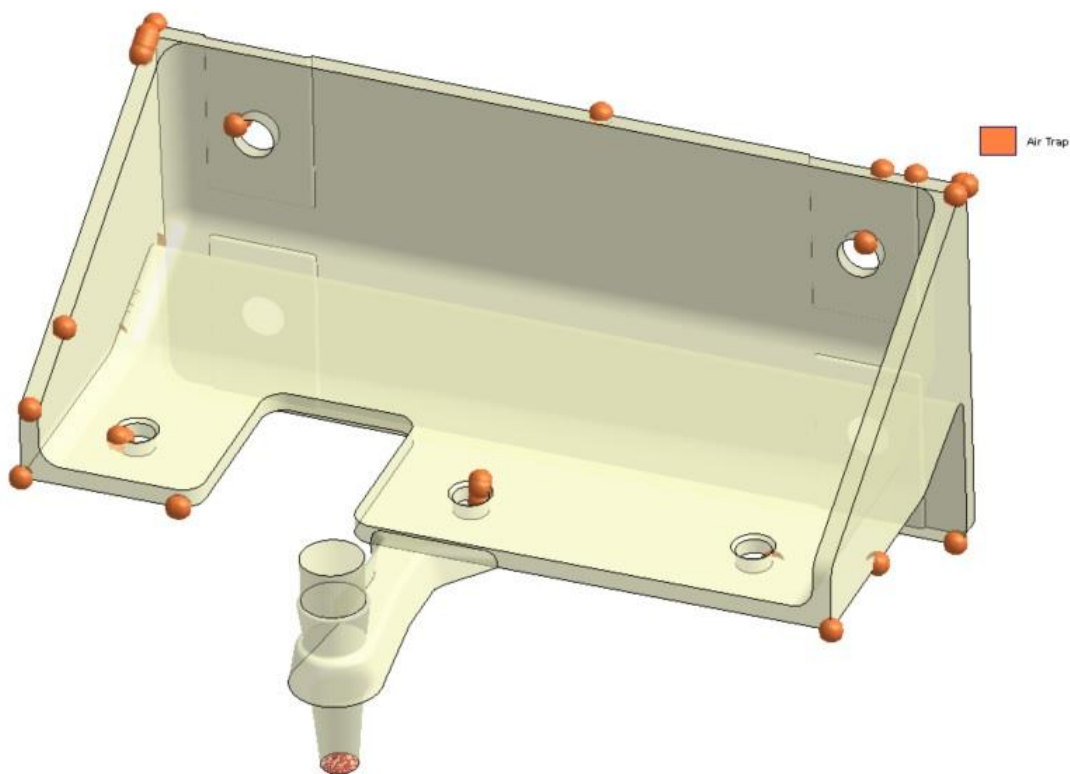


Figura 5.13 – Localização de zonas de prisão de ar na peça, vista de frente.

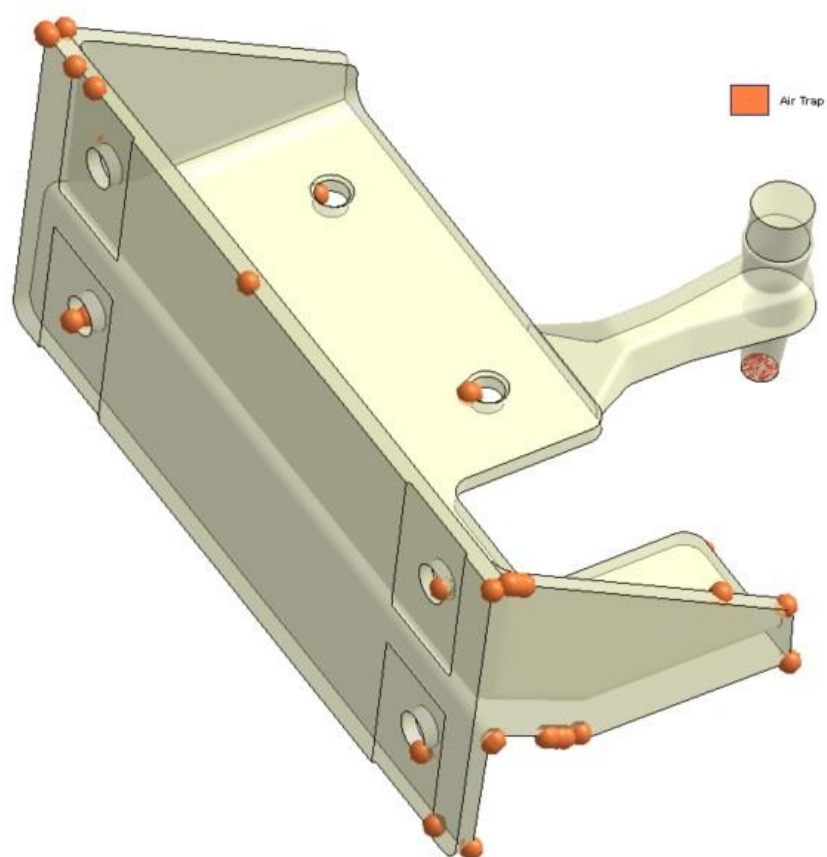


Figura 5.14 – Localização de zonas de prisão de ar na peça, vista de lateral.

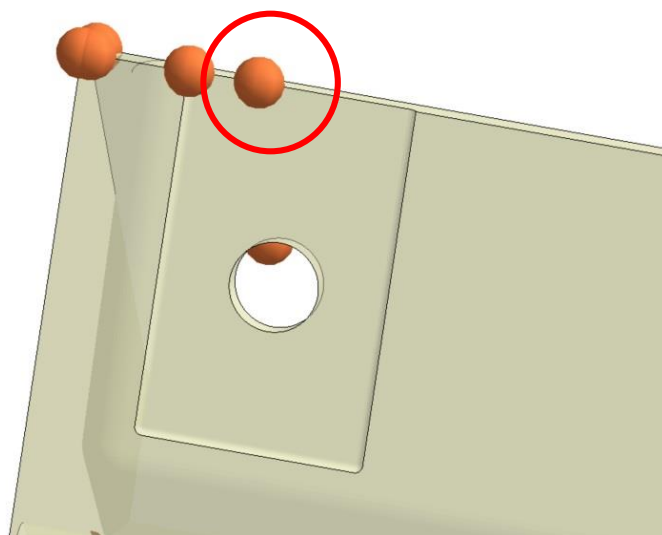


Figura 5.15 – Pormenor de fuga localizada, semelhante à observada no teste 1.

5.2.4 Rechupes

Através da observação do resultado apresentado relativamente aos rechupes, é possível prever onde estes se irão localizar, como estarão distribuídos e qual a sua profundidade prevista. Este aspecto pode ser muito importante no que respeita à funcionalidade prevista para a peça final, podendo levar a alterações no design da peça. Este efeito é possível de minimizar, aumentando a compactação do material, pois estes rechupes significam um défice de compactação. No entanto, há zonas críticas onde apenas a variação dos parâmetros de compactação não é suficiente. Na Figura 5.16 e na Figura 5.17 é possível observar a distribuição e a profundidade dos rechupes previstos para a peça injetada no molde M1724.

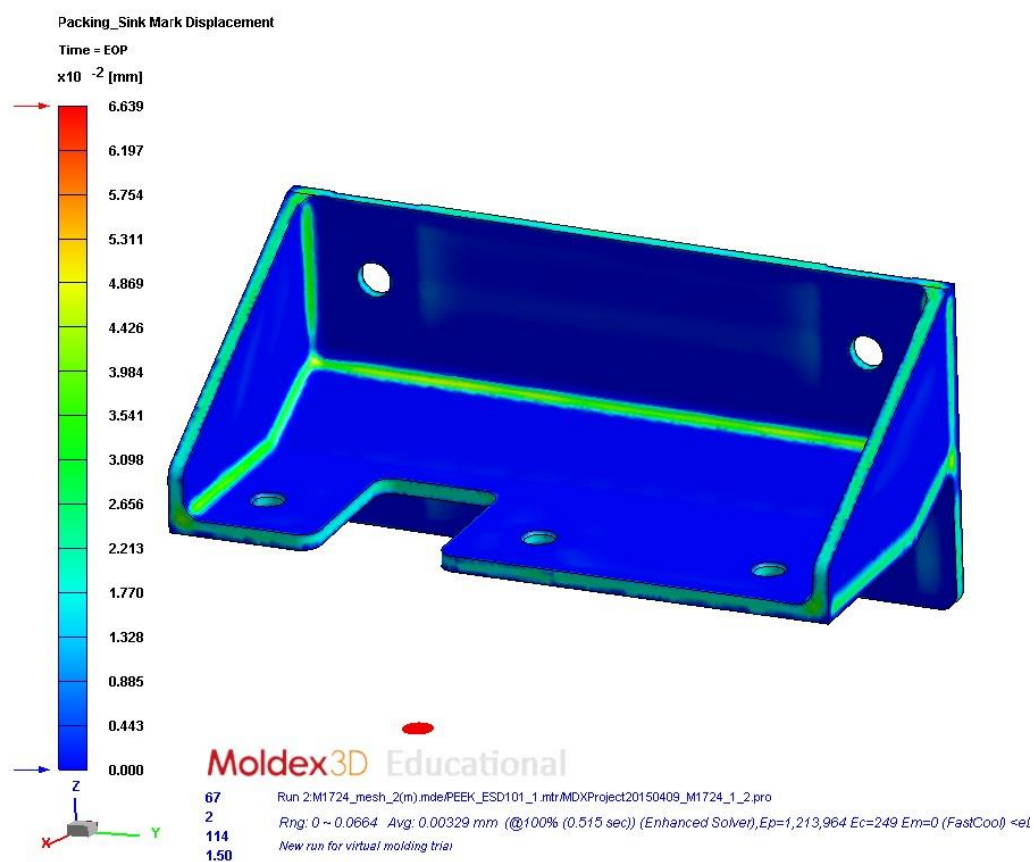


Figura 5.16 – Distribuição e profundidade dos rechupes observados (vista frontal).

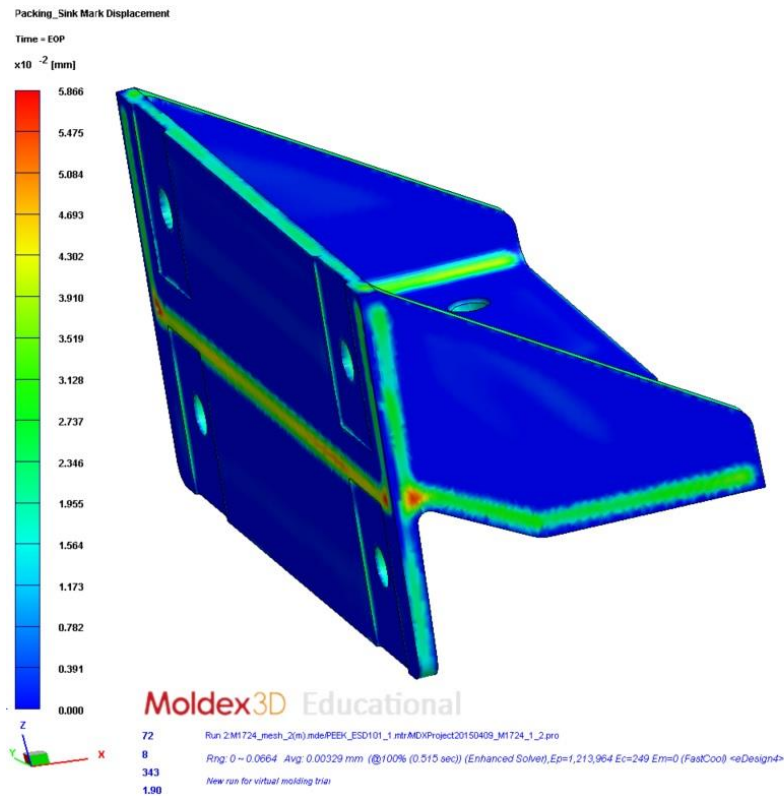


Figura 5.17 – Distribuição e profundidade dos rechupes observados (vista posterior).

5.2.5 Força de Fecho

Pela análise do gráfico obtido na simulação acerca da força de fecho (Figura 5.18), pode-se observar que o seu valor máximo é de 31,20 toneladas. Esta informação permite saber se a máquina prevista para a produção de peças utilizando este molde possui uma força de fecho suficiente à operação. Neste caso, a máquina prevista possui uma força de fecho de 110 toneladas, que é mais do que suficiente para a injeção do molde M1724.

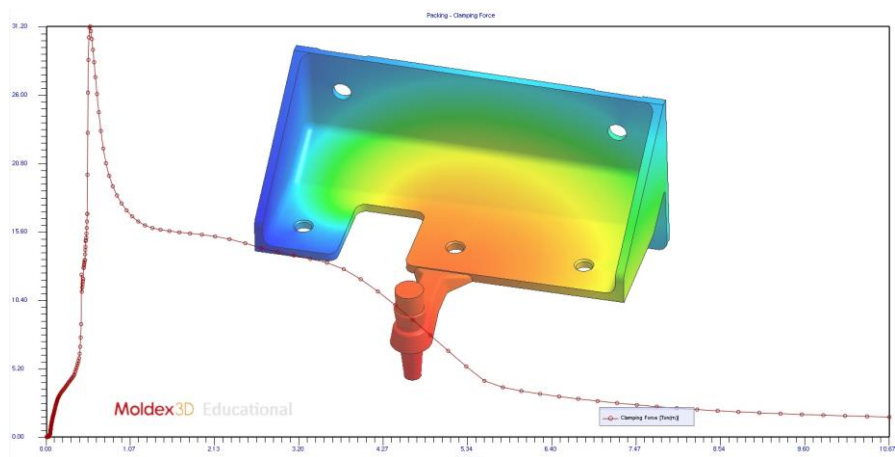


Figura 5.18 – Evolução da força de fecho, em toneladas, necessária para manter o molde fechado, durante o enchimento e a compactação, ao longo do tempo.

5.2.6 Massa da moldação

Através do gráfico representativo da massa da moldação (Figura 5.19), é possível observar a quantidade de material injetada no enchimento, e ainda a adicionada durante a compactação, atingindo o valor final de 50,19 gramas. Porém, o valor registado no teste é de 51,9 gramas, um pouco diferente, mas muito aproximado do previsto, o que comprova a fiabilidade da utilização deste *software* de simulação.

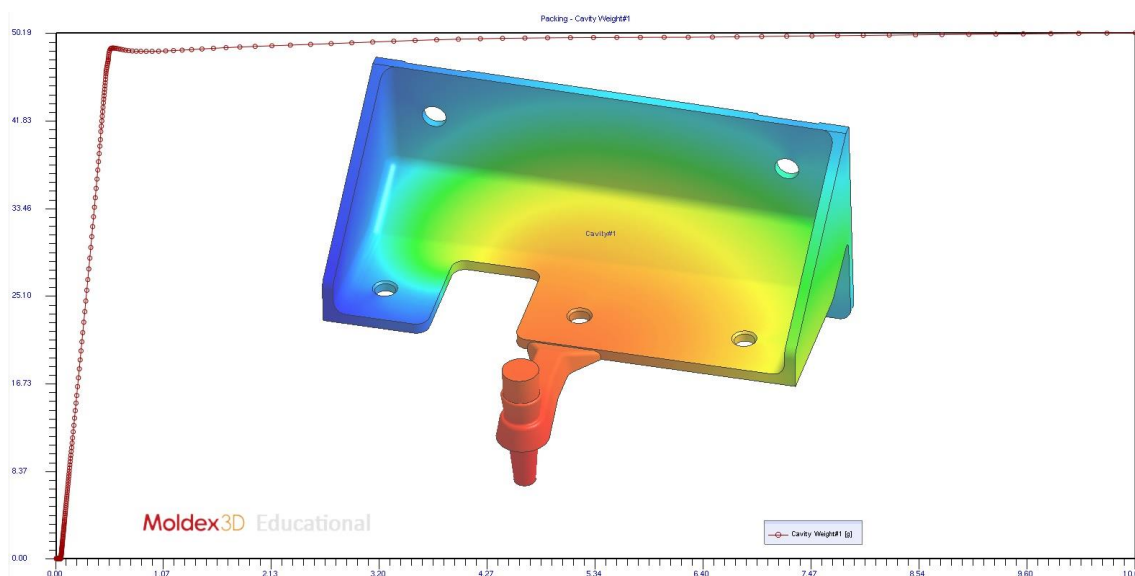


Figura 5.19 – Evolução da massa da moldação, durante o enchimento e compactação, ao longo do tempo.

5.3 Arrefecimento

O estudo do arrefecimento do molde permite prever o comportamento térmico da peça nesta fase, podendo dar origem a alterações na geometria da mesma, consoante as necessidades e finalidades a que o produto final se destina. É possível observar a distribuição de temperaturas a que a peça se encontra no final do tempo de arrefecimento, que corresponde também ao início da extração da peça, sendo as peças extraídas do molde às temperaturas ilustradas, em várias perspectivas, na Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22.

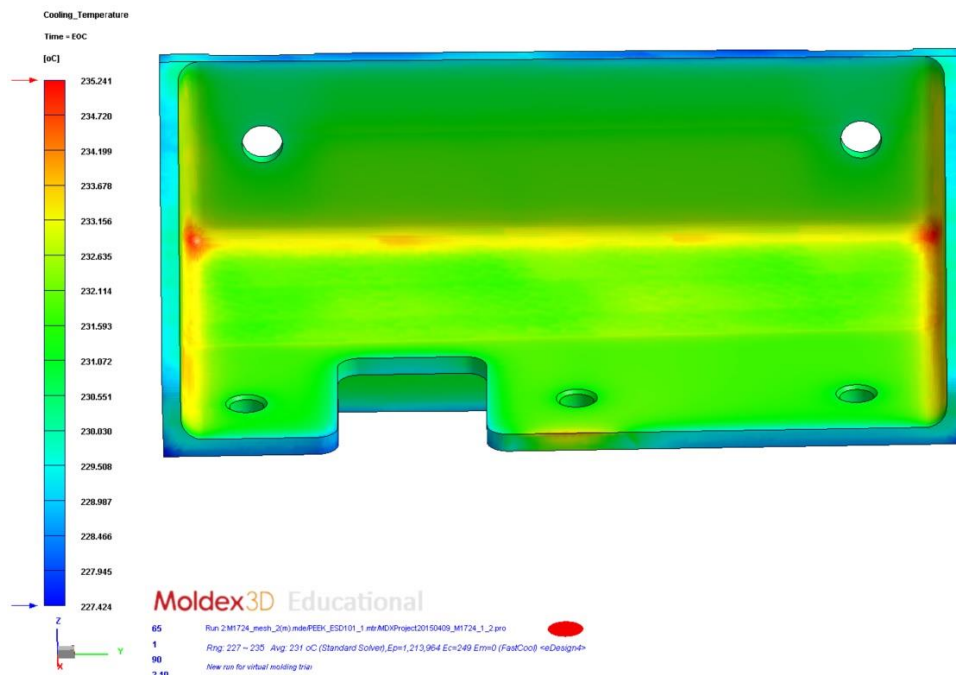


Figura 5.20 – Temperatura ao longo da superfície da peça, no final do tempo de arrefecimento (vista frontal).

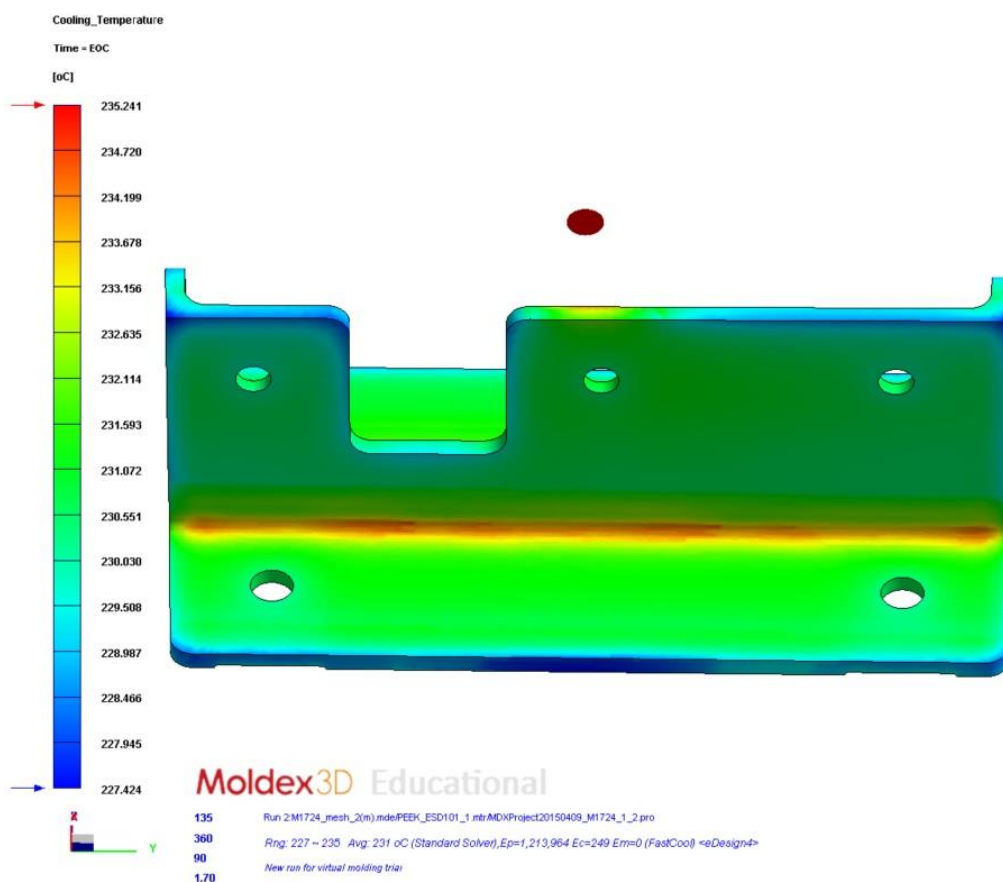


Figura 5.21 – Temperatura ao longo da superfície da peça, no final do tempo de arrefecimento (vista inferior).

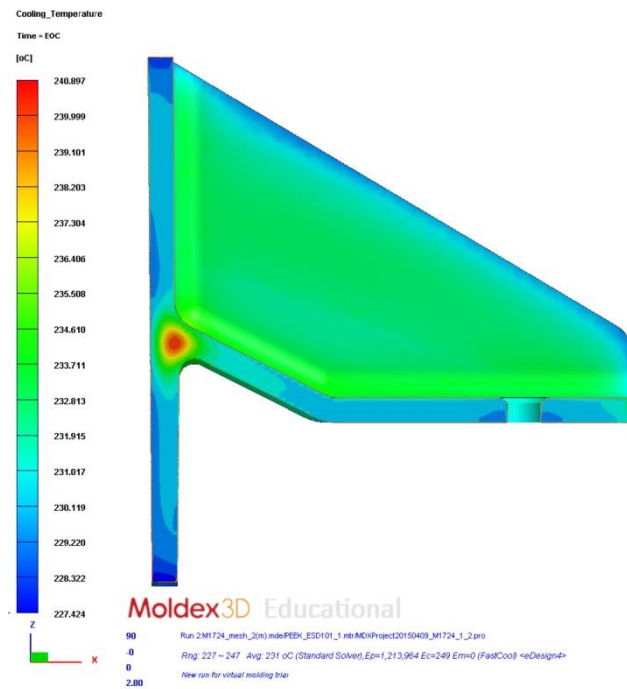


Figura 5.22 – Temperatura ao longo espessura da peça, no final do tempo de arrefecimento (vista em corte).

No entanto, é também importante saber a temperatura máxima ao longo da espessura da peça, pois sabendo apenas a da superfície não é suficientemente indicativo da possibilidade de extração da mesma. A Figura 5.23 representa a temperatura máxima ao longo da espessura da peça, sem necessidade de recorrer a cortes. É possível constatar na escala que a temperatura chega a ser cerca de 6°C mais elevada que na Figura 5.22.

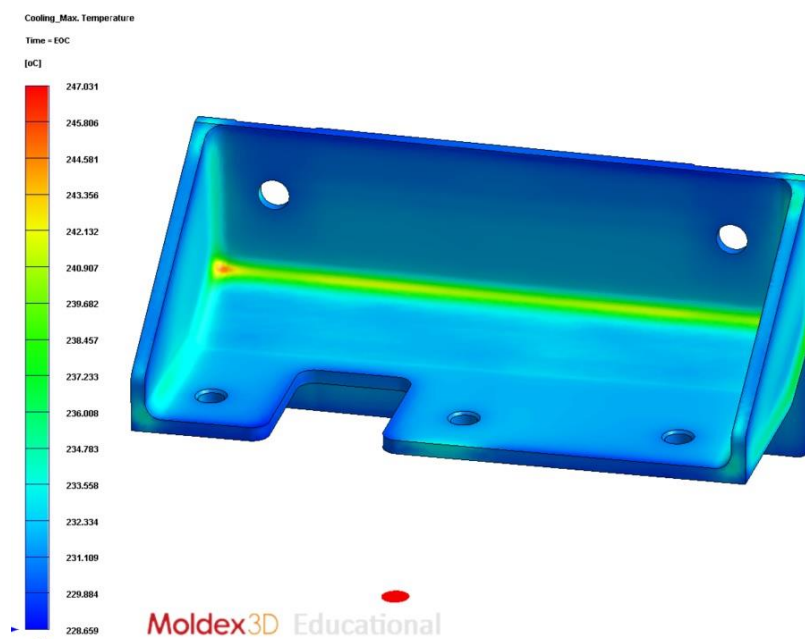


Figura 5.23 – Temperatura máxima verificada na espessura da peça, após o arrefecimento.

Na Figura 5.24 e Figura 5.25 apresenta-se o tempo de arrefecimento necessário, após o fim da compactação, para que a peça atinja a temperatura indicada para que a peça possa ser extraída. Assim, as figuras seguintes apresentam vistas em corte para que se possa observar as localizações que necessitam de mais tempo de arrefecimento, que são, como esperado, as zonas interiores da peça.

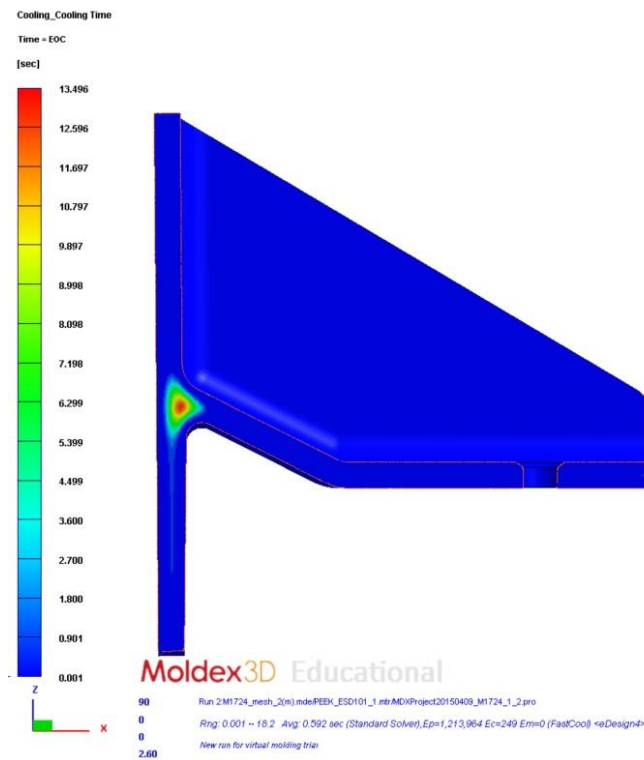


Figura 5.24 – Tempo de arrefecimento necessário para a extração, ao longo da peça (vista de corte em Y).

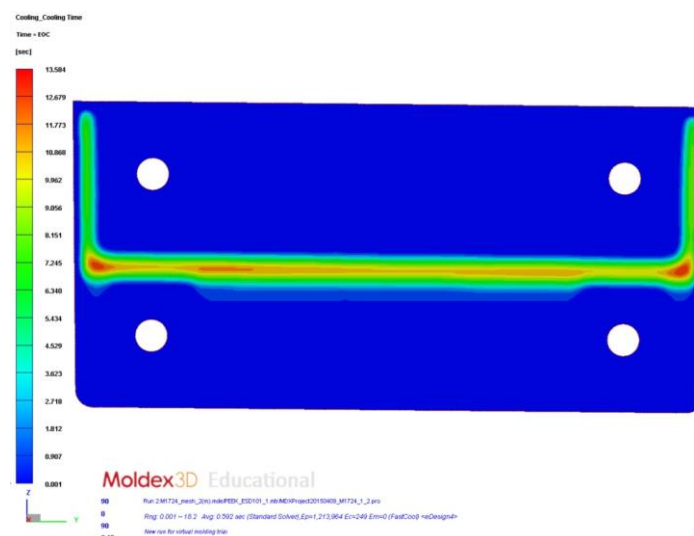


Figura 5.25 – Tempo de arrefecimento necessário para a extração, ao longo da peça (vista de corte em X).

5.4 Empeno

Os resultados apresentados na simulação pelo Moldex3D relativamente ao empeno podem ser de grande relevância tanto no projeto do molde, como também no design da peça. Consoante o empeno observado, este pode levar a alterações no design da peça com a finalidade de a reforçar em zonas chave para minimizar o empeno, podendo esse reforço ser feito de variadas formas, dependendo da funcionalidade e requisitos do produto final. Observando a tendência do empeno, pode também ser necessário alterar o projeto do molde, nomeadamente nos circuitos de refrigeração. Por um lado, arrefecer a peça mais rápido reduz o empeno observado, mas por outro, a utilização de temperaturas mais baixas leva a uma redução da temperatura do molde, que pode diminuir o fluxo de material e aumentar assim a pressão de injeção necessária, resultando então numa relação de compromisso que deve ser tida em consideração.

Também pode ser necessário fazer alterações na modelação da cavidade a preencher, pois o *software* permite também a exportação de um ficheiro com o formato STL que apresenta um inverso do empeno, representando como a cavidade deve ser modelada para que, após o empeno, a peça apresente a geometria pretendida inicialmente. Se o empeno for mínimo, este pode ser melhorado modificando apenas alguns parâmetros de injeção, nomeadamente o tempo de arrefecimento e a temperatura dos canais de refrigeração. É possível observar o empeno na Figura 5.26, Figura 5.27 e Figura 5.28 em mm, relativamente aos eixos X, Y e Z, respetivamente. É de notar que este empeno engloba também o efeito de contração, e é relativo à cavidade por preencher no molde, e não ao Artigo. Na Figura 5.29, é demonstrada uma fatia que mostra o empeno junto ao ataque, possivelmente originado pela temperatura mais elevada aí presente, levando a um arrefecimento mais demorado nessa zona.

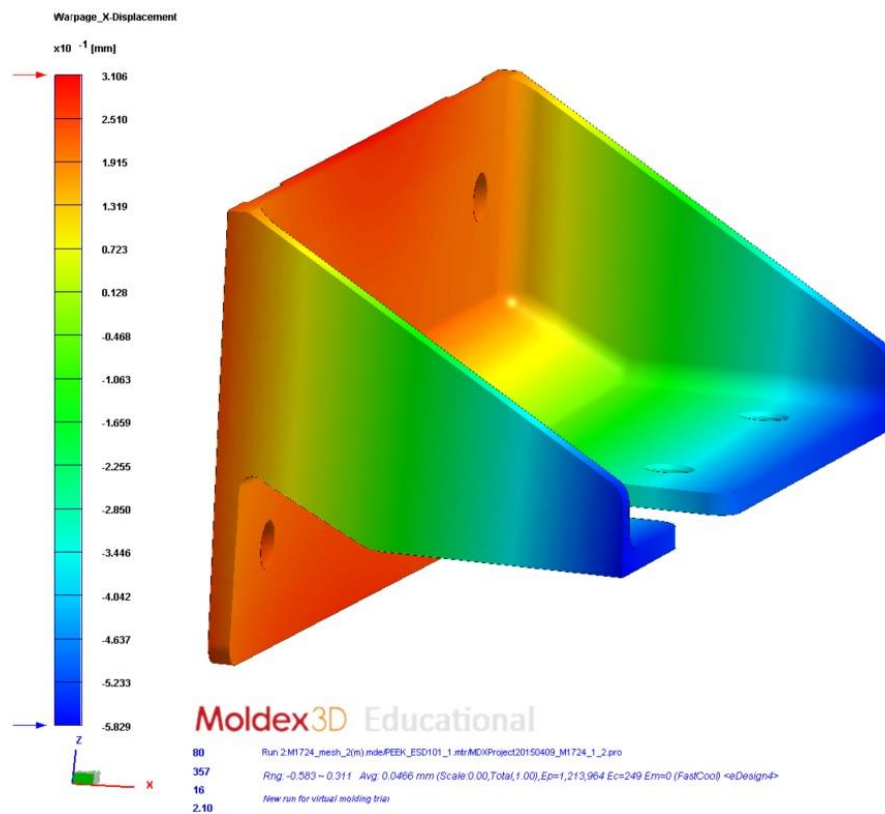


Figura 5.26 – Empeno em X.

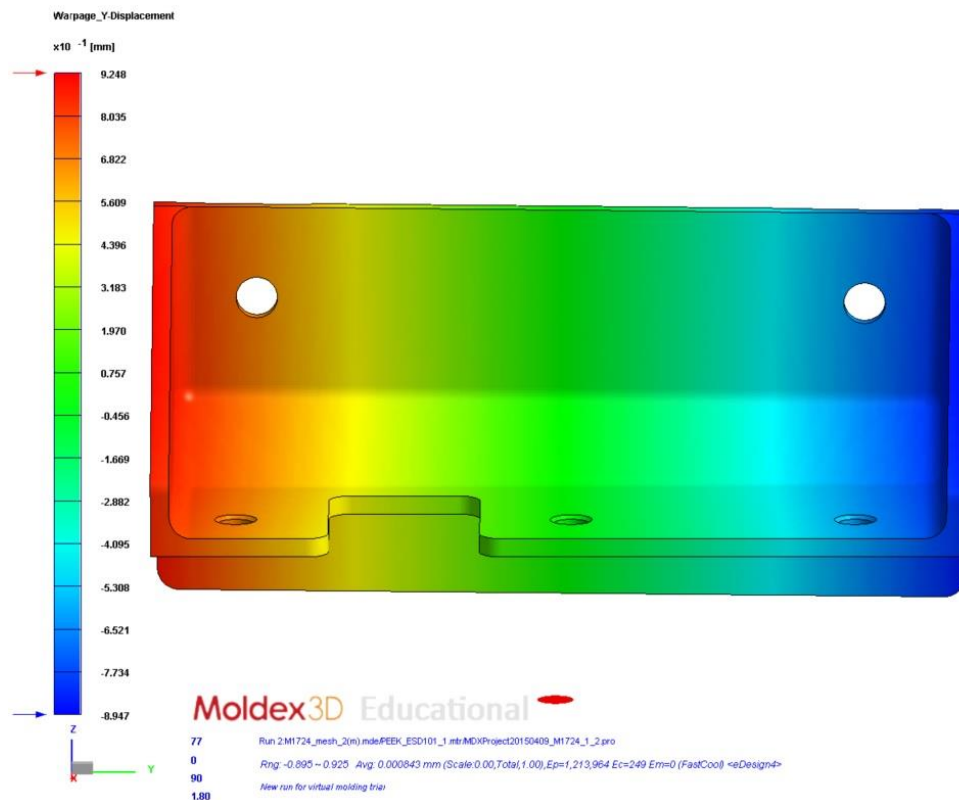


Figura 5.27 – Empeno em Y.

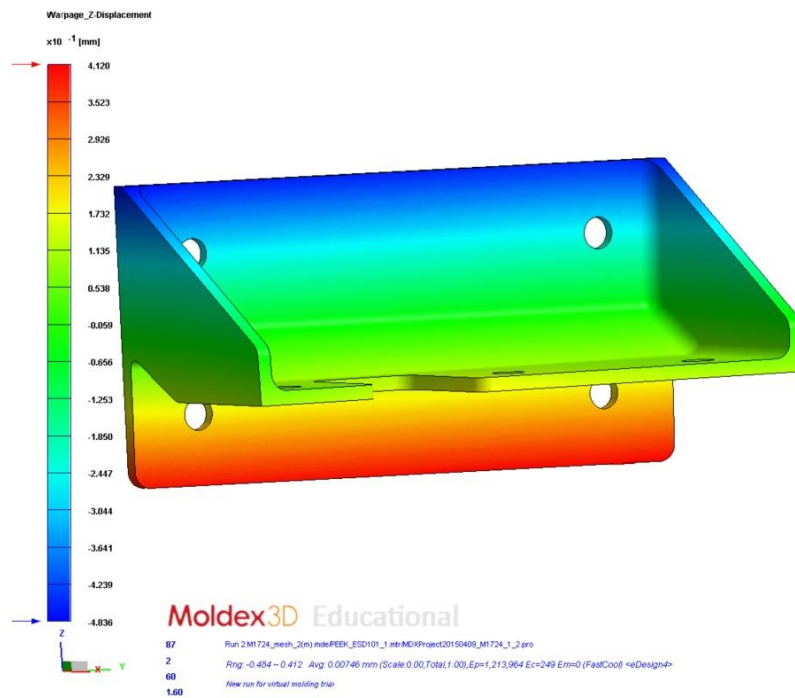


Figura 5.28 – Empeno em Z.

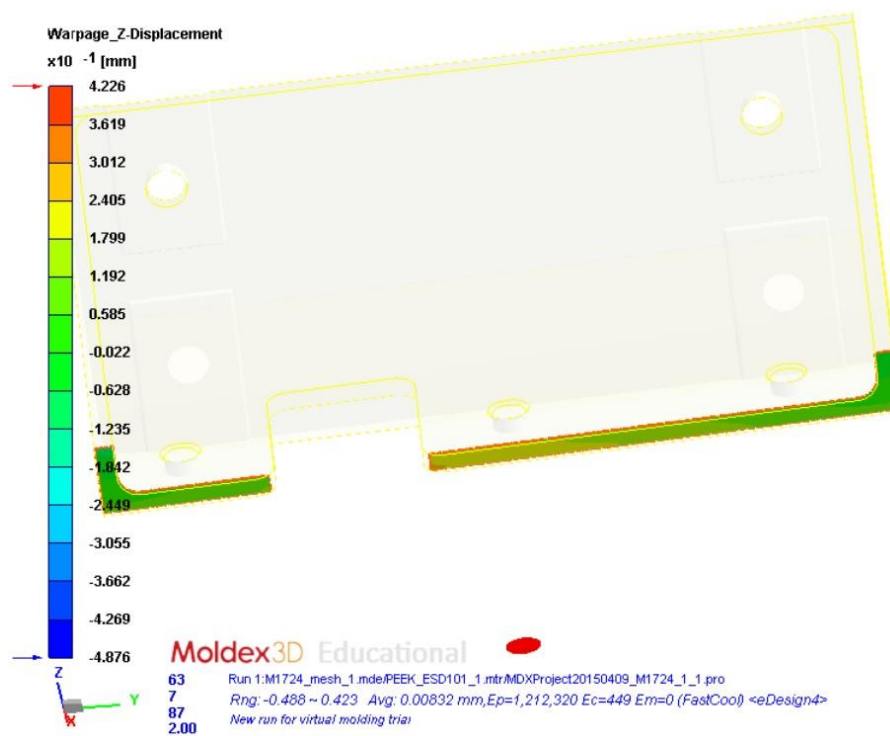


Figura 5.29 – Empeno na superfície de base, junto ao jito, em Z.

5.5 Sumário dos Resultados

Concluídos os resultados, é possível verificar que o Moldex3D pode ter várias intervenções ao longo do processo do molde, contribuindo assim para uma melhoria do mesmo, recorrendo a Engenharia Simultânea, conforme ilustrado na Figura 5.30.

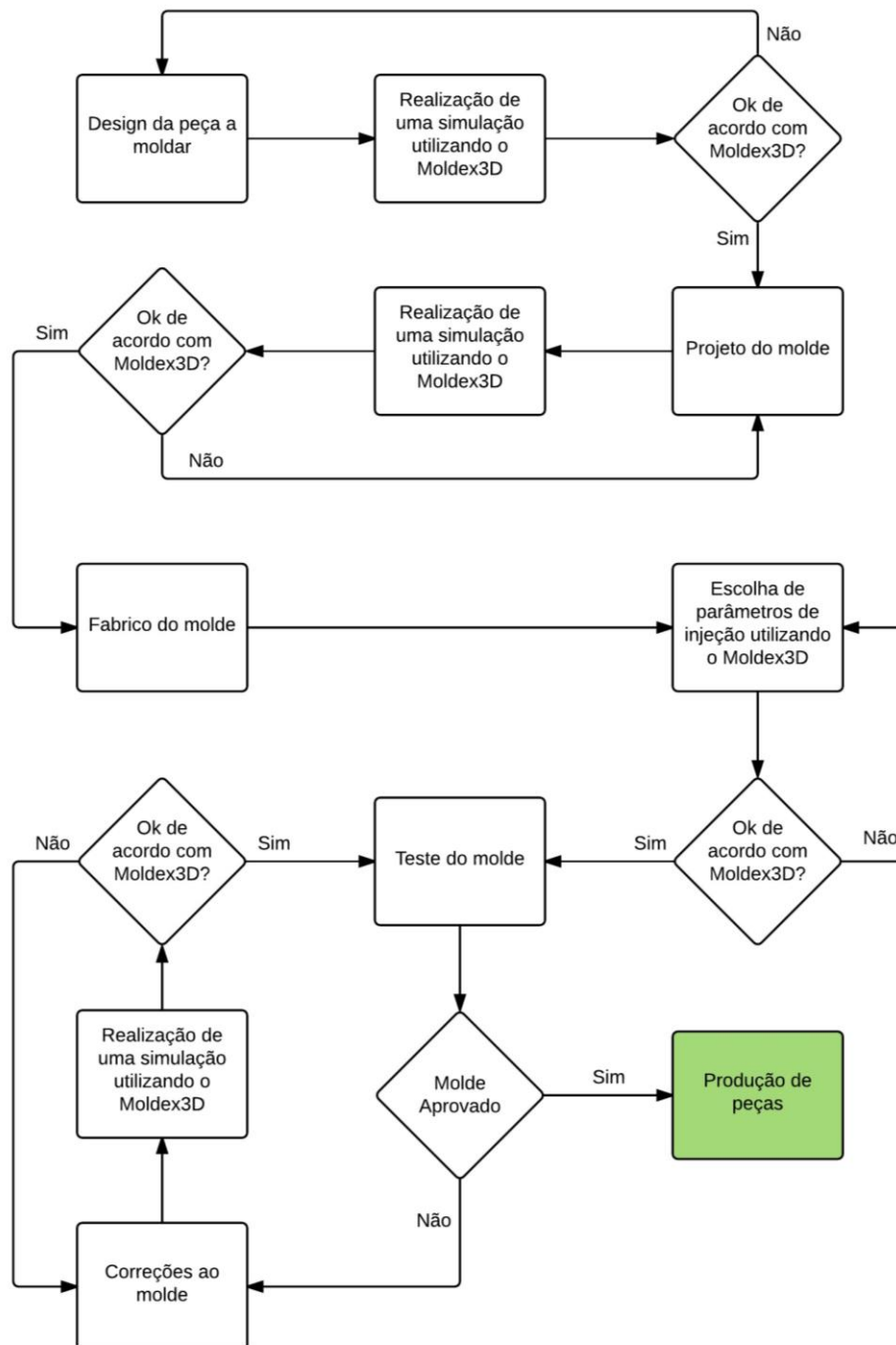


Figura 5.30 – Fluxograma ilustrativo da aplicabilidade do Moldex3D na indústria dos moldes de injeção.

6 Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro

Esta Dissertação teve como objetivo o projeto do molde M1724 e procurar a sua otimização, analisando todos os seus aspetos, estabelecendo uma relação com o *software* Moldex3D com vista a confirmar a sua fiabilidade e as vantagens que pode acrescentar ao projeto e ao produto final.

Após a observação dos resultados obtidos nos testes dos moldes e analisando com os resultados do Moldex3D, é possível concluir que:

- Os aspetos comentados após o primeiro teste foram os que apresentam mais falhas na análise do capítulo 4.1, tendo sido observadas 74,8% de falhas relativamente às fugas de gases e 64,9% relativamente às rebarbas;
- O molde foi aprovado ao 2º teste, apresentando uma otimização face à media registada de 3,27 testes no capítulo 4.1, onde se constata também na Tabela 4.1 Estão dentro dos 39,7% moldes aprovados com menos de 3 testes;
- Se o Moldex 3D tivesse sido utilizado no momento do projeto, o comentário feito acerca das fugas de gases poderia ter sido evitado, dado que o resultado obtido aponta exatamente para a localização observada no teste;
- O Moldex3D pode contribuir para a otimização de grande parte das etapas de construção de um molde. Começando pelo design da peça a moldar, pois os resultados podem levar a alterações na sua geometria, nomeadamente devido a linhas de soldadura e empeno. Na fase do projeto é quando o software pode ter mais influência, dado que os resultados esclarecem ou corrigem as considerações sobre localização e tipo de ataque, fugas de gases, canais de refrigeração, geometria, etc. Além destes, e embora fora do objetivo da dissertação, conclui-se também que o Moldex3D permite otimizar os parâmetros de injeção.

Como sugestão de trabalho futuro propõe-se a realização de um estudo de análise estrutural, com vista a analisar a transmissão de calor da peça para os canais de refrigeração (em particular) e os fluxos de calor dentro do molde, durante uma injeção, utilizando o projeto de um molde para injetar PEEK, dadas as suas condições de funcionamento. Esta análise permitiria avaliar a eficiência dos canais de refrigeração do molde, podendo alterar a sua distância às zonas moldantes (por vezes torna-se complicado arranjar estratégias para os aproximar o mais possível) e comparar com o inicial, de modo a retirar conclusões acerca da influência da distância dos mesmos, por exemplo. Feito o estudo, poderá também ser interessante verificar a contribuição das chapas isolantes, que neste tipo de molde estão colocadas em toda a sua envolvente. Outra proposta de trabalho futuro passa pelo dimensionamento da espessura das

“chapas dos moldes”, na indústria estas são sobredimensionadas para que não haja o risco de flexão e deformação devido à pressão de injeção aplicada na área projetada.

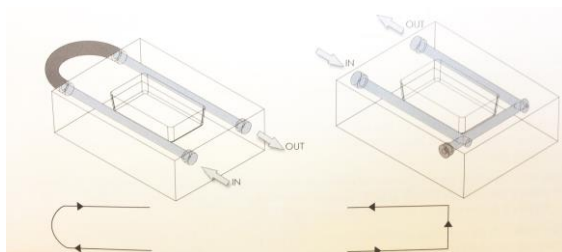
7 Bibliografia

- [1] Centimfe e Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, Manual do Projectista para moldes de injeção de plástico, Marinha Grande: Centimfe, 2004.
- [2] G. Menges e P. Mohren, How to Make Injection Molds, Munich: Hanser Publishers, 1993.
- [3] Custom Part, “CustomPartNet,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>. [Acesso em 05 03 2015].
- [4] F. Johannaber, Injection Molding Machines, Munich: Hanser Publishers, 1994.
- [5] P. T. Gutowski, “MIT - web.mit.edu,” 2006. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/2.810/www/lecture/Injection%20Molding%20Final.pdf>. [Acesso em 08 06 2015].
- [6] Simtec, “Simtec Silicon Parts,” [Online]. Available: <http://www.simtec-silicone.com/capabilities/lsr2-shot/>. [Acesso em 26 03 2015].
- [7] Custom Part, “CustomPartNet,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/glossary/s>. [Acesso em 15 03 2015].
- [8] CEFAMOL, Injeção e Plásticos - Nível Básico, Marinha Grande: CEFAMOL, 2010.
- [9] R. A. Malloy, Plastic Part Design for Injection Molding, Munich: Hanser Publishers, 1994.
- [10] P. Labs, “Proto Labs,” [Online]. Available: <http://www.protolabs.com/injection-molding/fundamentals-of-molding/draft>. [Acesso em 15 03 2015].
- [11] VICTREX, “Vitrex Aerospace Brochure 2014”.
- [12] VICTREX, “Material Datasheet Vitrex ESD 101”.
- [13] ADS Northern Ireland, “DENROY/BOMBARDIER PEEK BRACKET PROJECT WORKING WELL,” *ADS Group*, 12 Junho 2012.

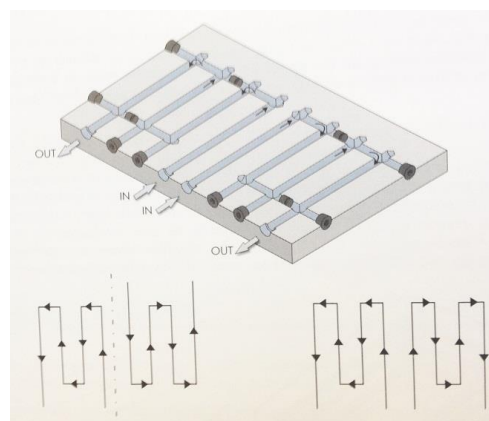
- [14] VICTREX, "Viktrex Polymer Solutions," Victrex, USA, July 2014.
- [15] M. Plastics, "Milton Plastics," [Online]. Available:
<http://www.miltonplastics.com/index.php/Picture/show/10.html>. [Acesso em 06 02 2015].
- [16] L. T. Industries, "Lati," [Online]. Available:
http://www.lati.com/en/news/2009/high_modulus_carbon_fibres_in_super-structural_compounds.html. [Acesso em 09 02 2015].
- [17] A. Group, "Aktas Group," [Online]. Available: <http://www.aktasgroup.com.tr/en/urunler-2/rexoil-heat-transfer-oil-32/>. [Acesso em 12 06 2015].

8 Anexos

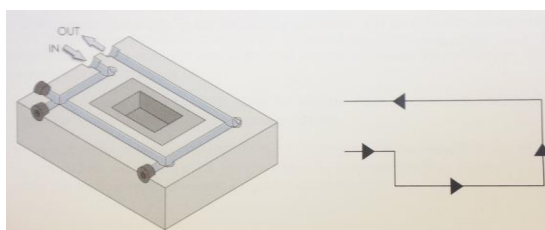
Anexo A – Soluções de Refrigeração



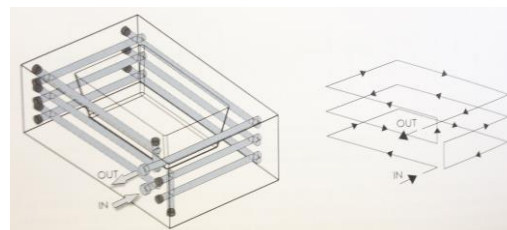
Circuito em U



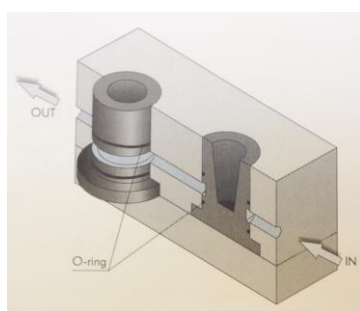
Circuito em Z



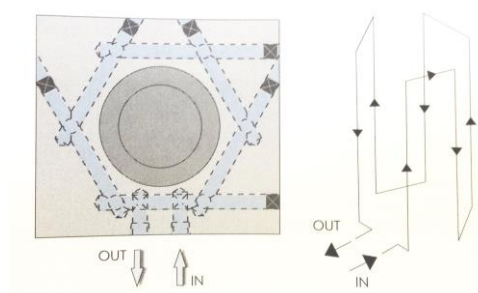
Circuito para cavidades retangulares



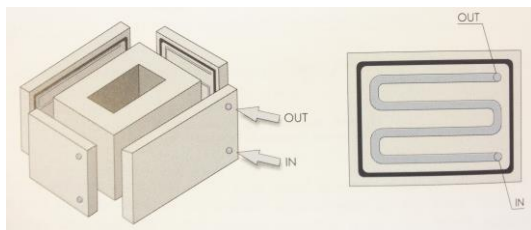
Circuito retangular em diferentes níveis



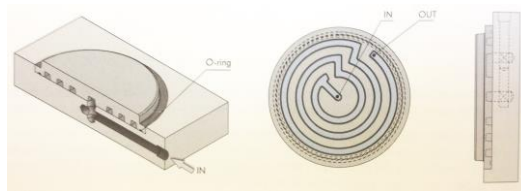
Circuito para cavidades circulares



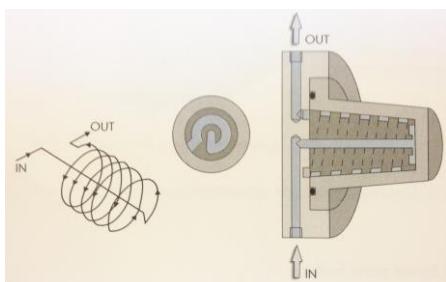
Circuito alternativo para cavidades circulares



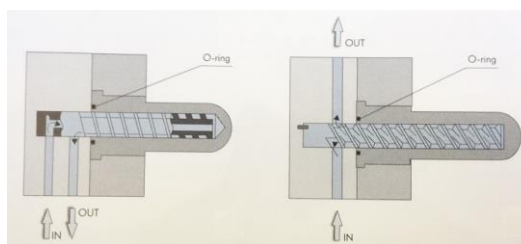
Colocação de placas de refrigeração



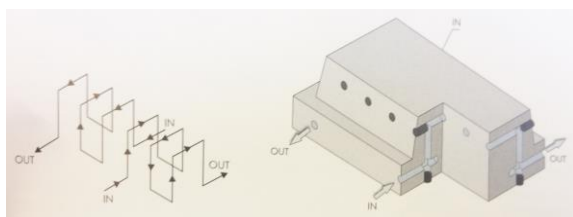
Circuitos de águas abertos em espiral



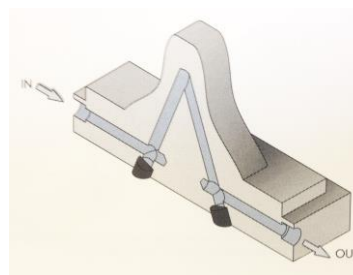
Circuito de águas com canal helicoidal



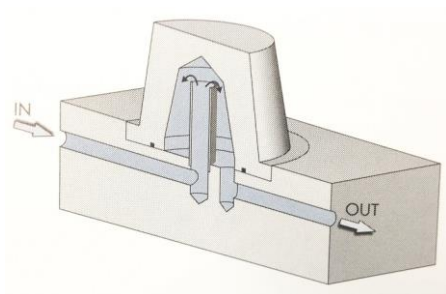
Circuitos de águas com núcleo de refrigeração helicoidal



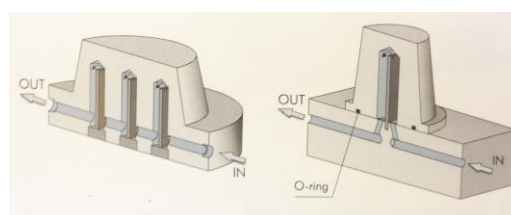
Circuito de água maquinado diretamente na bucha



Circuito de água inclinado



Circuito de águas em cascata com núcleo de refrigeração



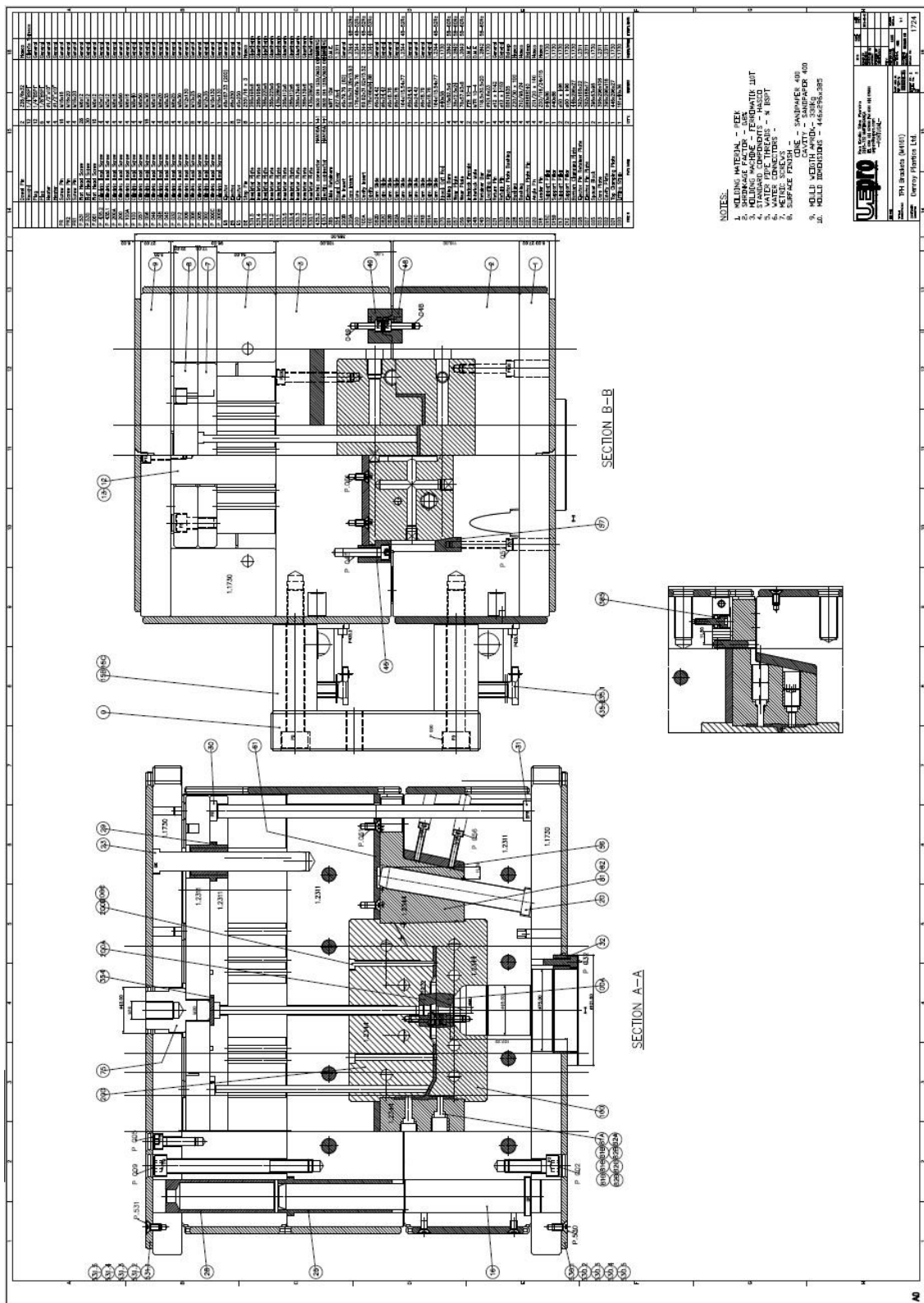
Circuito de águas em cascata com lâmina separadora (palheta)

Anexo B – Resumo PEEK

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Total	Total (%)													
Nº de Moldes	5	8	7	6	15	12	15	6	20	5	20	5	7	131	100%													
Moldes aprovados ao:																												
1º Teste		4					1	1						6	4,6%													
2º Teste	1	3	1	1	6	3	10	3	5		9	3	1	46	35,1%													
3º Teste	1	1		3	6	1	2	1	7	1	3	2	3	31	23,7%													
4º Teste	2		2	2	3	2	1	1	5	2	4			24	18,3%													
5º Teste			2			1	1		2		2		3	11	8,4%													
6º Teste	1		2			1			1	2	1			8	6,1%													
7º Teste						2								2	1,5%													
8º Teste						1					1			2	1,5%													
9º Teste						1								1	0,8%													
10º Teste															0													
Nº médio de testes	3,80	1,63	4,57	3,17	2,80	4,92	2,40	2,33	3,35	4,60	3,35	2,40	3,71	3,27														
1º Teste																												
1 - Rebarba Extractores	1	20%	0	0	5	33%	6	50%	2	13%	1	17%	4	20%	1	20%	6	30%	3	60%	1	14%	3	60%	1	14%	36	27,5%
2 - Dimensões Pernos	4	80%	0	0	7	47%	5	42%	5	33%	3	50%	8	40%	1	20%	3	15%	0	0%	5	71%	0	0%	5	71%	50	38,2%
3 - Fugas Gases	4	80%	8	100%	13	87%	9	75%	8	53%	3	50%	13	65%	4	80%	14	70%	5	100%	6	86%	5	100%	6	86%	98	74,8%
4 - Desacertos Juntas	3	60%	0	0	6	86%	2	67%	9	60%	8	67%	9	60%	3	60%	10	50%	1	20%	4	57%	1	20%	4	57%	66	50,4%
5 - Acertar extractores c/Bucha	3	60%	3	38%	4	57%	2	58%	8	53%	7	58%	4	67%	5	100%	10	50%	3	60%	6	86%	3	60%	6	86%	71	54,2%
6 - Rebarbas	5	100%	1	13%	6	86%	5	100%	12	80%	12	100%	11	55%	4	80%	12	60%	2	40%	5	71%	2	40%	5	71%	85	64,9%
7 - Gravitações não de acordo	2	40%	0	0	3	43%	3	42%	5	20%	3	43%	1	17%	4	20%	0	0%	2	40%	4	57%	2	40%	4	57%	31	23,7%

[illegible]

Anexo D – Desenho final 2D do molde M1724 (Corte)



Anexo E – Glossário da terminologia utilizada

Terminologia corrente	Terminologia correta
Chapa 1	Placa de aperto da injeção
Chapa 2	Placa das cavidades
Chapa 3	Placa das buchas
Chapa 4	Placa de reforço das buchas
Chapa 5	Calço
Chapa 6	Calço
Chapa 7	Placa dos extratores
Chapa 8	Placa de aperto dos extratores
Chapa 9	Placa de aperto da extração